

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

DIPLOMSKI RAD

Filip Oršić

Zagreb, 2008.g.

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Dr.sc. Ivan Budić, prof.

Filip Oršić

Zagreb, 2008.g.

SAŽETAK

Predmet razmatranja rada je opis tehnologije lijevanja odljevaka korištenjem polistirenskih modela te mjerenje livljivosti aluminija. Rad započinje kratkim opisom tehnologije lijevanja, materijala za izradu modela i materijala za izradu kalupa. Detaljno je opisana izrada modela od polistirena koji se koriste za lijevanje u pune kalupe. Također se osvrnulo na prednosti i nedostatke postupka te greške pri lijevanju. Pri ispitivanju livljivosti vidljivo je kako livljivost ovisi o gustoći polistirena za izradu modela, temperaturi ulijevanja, visini kalupa i sabijenosti kalupa kako je prikazano u ovom radu.

SADRŽAJ

POPIS SLIKA

POPIS TABLICA

POPIS OZNAKA

1.	UVOD.....	1
1.1	Općenito o tehnologiji lijevanja	11
1.2	Razvoj ljevarstva	12
1.3	Razvoj lijevanja u pune kalupe	19
1.4	Primjeri odljevaka lijevanih u pune kalupe	21
2.	VRSTE MODELA.....	24
2.1	Sagorivi modeli.....	26
3.	JEDNOKRATNI I STALNI KALUPI	36
3.1	Materijali za izradu jednokratnih kalupa	38
3.2	Kalupni materijali bez veziva.....	39
3.2.1.1.	<i>Svojstva kalupnih materijala bez veziva.....</i>	<i>43</i>
3.3	Kalupljenje	45
3.3.1.1.	<i>Ulijevanje litine.....</i>	<i>48</i>
3.3.2.	<i>Hlađenje, istresanje i čišćenje odljevaka.....</i>	<i>53</i>
3.3.2.1.	<i>Hlađenje odljevaka.....</i>	<i>53</i>
3.3.2.2.	<i>Istresanje odljevaka.....</i>	<i>56</i>
3.3.2.3.	<i>Čišćenje odljevaka.....</i>	<i>57</i>
4.	OBILJEŽJA LIJEVANJA U PUNE KALUPE	64
5.	GREŠKE NA ODLJEVCIMA	68
5.1	Greške na odljercima pri lijevanju u pune kalupe	71
6.	ISPITIVANJE LIVLJIVOSTI METALA PRI UPOTREBI POLISTIRENSKIH MODELA.....	82
6.1	Probno lijevanje.....	86
6.2	Lijevanje uz određena poboljšanja.....	96
7.	REZULTATI ISPITIVANJA	102
7.1	Metoda najmanjih kvadrata	102
7.2	Analiza rezultata ispitivanja	106
8.	ZAKLJUČAK	117
9.	LITERATURA	118

Slika 1.1 Učešće odljevaka u masi stroja nekih grana strojogranje [3]	15
Slika 1.2 Ovisnost cijene odljevka o veličini serije [2]	16
Slika 1.3 Prikaz ljevačke proizvodnje u R. Hrvatskoj od 1995. do 2005. god. [3]	17
Slika 1.4 Struktura ljevačke proizvodnje u R. Hrvatskoj od 1995. do 2005. god. [3].	18
Slika 1.5 Dio mača [4].....	21
Slika 1.6 Blok motora [5].....	22
Slika 1.7 Blok motora [5].....	22
Slika 1.8 Cilindarska glava [6]	23
Slika 1.9 Blok motora tvrtke GM [7]	23
Slika 2.1 Shematski prikaz podjele modela	25
Slika 2.2 Proizvodnja polistirena [3].....	26
Slika 2.3 Stanična struktura pjenastog polistirena [3]	28
Slika 2.4 Oblik zrna polistirena prije i nakon pjenjenja u kalupu [3]	29
Slika 2.5 Prikaz nepopunjenosti alata polistirenom pri vrhu [3].....	30
Slika 2.6 Tijek stezanja pjenastih modela od polistirena nakon izbacivanja iz kalupa za oblikovanje (pjenjenje) [3]	30
Slika 2.7 Pjenasti polistirenski blok [8].....	31
Slika 2.8 Modelni grozd od pjenastog polistirena za lijevanje ispušnih grana automobila [3]	31
Slika 2.9 Proizvodnja modela od pjenastog polistirena [8].....	32
Slika 2.10 Izrada modela od pjenastog polistirena za čelični odljevak [8].....	33
Slika 2.11 Pjenasti polistirenski modeli [9].....	33
Slika 2.12 Pjenasti polistirenski modeli [9].....	34
Slika 2.13 Model za teški alat preše prikazan u različitim proizvodnim fazama [3]...	35
Slika 2.14 Dijelovi polistirenskog bloka motora.....	35
Slika 3.1 Shematski prikaz upotrebe različitih vrsta kalupa [3]	36
Slika 3.2 Podjela materijala za izradu jednokratnih kalupa kod lijevanja u pune kalupe [3]	38
Slika 3.3 Dijagrami mehanika tla za pijesak bez kohezije [3].....	41
Slika 3.4 Strukturne konfiguracije kuglastih zrna [3]	42
Slika 3.5 Uvećani dijagram koji pokazuje vatrostalnu prevlaku [3]	43
Slika 3.6 Kalupne naprave za različite postupke lijevanja [3]	45
Slika 3.7 Postupak kalupljenja pri ulijevanju u šuplji kalup (lijevo) i pri lijevanju u puni kalup (desno) [3]	46

Slika 3.8	Proizvodne faze pri lijevanju u pune kalupe [3].....	47
Slika 3.9	Ulijevanje litine u pune kalupe [10]	53
Slika 3.10	Simulacija skrućivanja bloka motora lijevanog u čisti pijesak [7].....	55
Slika 3.11	Shematski prikaz postupaka istresanja odljevka iz kalupa [3].....	56
Slika 3.12	Bubnjasta čistilica tvrtke <i>Didion</i> [11]	58
Slika 3.13	Bubnjasta čistilica i konvejer s odljevcima [11]	59
Slika 3.14	Automatsko sačmanje odljevaka tvrtke <i>Rösler</i> pomoću robota <i>Roboblaster RROB 350/1200-4</i> [12]	61
Slika 3.15	Tunelska sačmalica sa kontinuiranom trakom tvrtke <i>Rösler tip RMBD 500</i> [12].....	63
Slika 5.1	Klasifikacija ljevačkih grešaka [3].....	69
Slika 5.2	Uzvisine na gornjoj površini odljevka [3]	72
Slika 5.3	Mjehuravost na površini odljevka [3].....	73
Slika 5.4	Shematski prikaz mikro i makro poroznosti [3].....	74
Slika 5.5	Napuklina na vanjskom rubu odljevka [3]	75
Slika 5.6	Brazgotine [3].....	76
Slika 5.7	Neispunjenost odljevka [3].....	77
Slika 5.8	Neispravan model [3].....	78
Slika 5.9	Izvitoperenje modela u odnosu na ispravni model [3].....	79
Slika 5.10	Netočne dimenzije i izvitoperenje modela [3].....	80
Slika 5.11	Grafitni film na površini i prijelomu odljevka kod lijevanog željeza s kuglastim grafitom [3].....	81
Slika 6.1	Granule polistirena [13].....	82
Slika 6.2	Čelijasta struktura polistirena [13].....	82
Slika 6.3	Polistirenski model za probno lijevanje	86
Slika 6.4	Model spusta	86
Slika 6.5	Prikaz kalupljenja.....	87
Slika 6.6	Prikaz kalupljenja.....	87
Slika 6.7	Sabijen donjak	88
Slika 6.8	Popunjavanje gornjaka	89
Slika 6.9	Sabijen kalup	89
Slika 6.10	Gotov kalup.....	90
Slika 6.11	Peć	90
Slika 6.12	Pirometar	91

Slika 6.13 Ulijevanje litine	92
Slika 6.14 Odljevak lijevan korištenjem polistirena gustoće 30 kg/m ³	93
Slika 6.15 Odljevak lijevan korištenjem polistirena gustoće 12 kg/m ³	93
Slika 6.16 Sagoreni polistirenski model gustoće 30 kg/m ³ u kalupu	94
Slika 6.17 Sagoreni polistirenski model gustoće 12 kg/m ³	94
Slika 6.18 Probni odljevci dobiveni korištenjem polistirenskih modela različitih gustoća	95
Slika 6.19 Modeli na modelanoj ploči	96
Slika 6.20 Modeli u sabijenom donjaku	97
Slika 6.21 Sabijen kalup neposredno prije vađenja modela spusta i popunjen do visine 150 mm.....	98
Slika 6.22 Izrađeni kalup te popunjen do visine 150 mm.....	98
Slika 6.23 Kalup pun do visine 75 mm i sabijen	99
Slika 6.24 Odljevci u kalupu	100
Slika 6.25 Odljevci lijevani korištenjem polistirenskih modela gustoće 12 kg/m ³	100
Slika 6.26 Odljevci lijevani korištenjem polistirenskih modela gustoće 30 kg/m ³	101
Slika 7.1 Primjer rasapa podataka [14].....	103
Slika 7.2 Pravac regresije [14].....	104
Slika 7.3 Pravac uz upotrebu metoda najmanjih kvadrata [14].....	104
Slika 7.4 Odljevci uz potpuno popunjen kalup (visine 150 mm).....	106
Slika 7.5 Graf ovisnosti temperature i duljine uz upotrebu polistirenskih modela gustoće 12 kg/m ³ te uz visinu kalupa 150 mm.....	108
Slika 7.6 Graf ovisnosti temperature i duljine uz upotrebu polistirenskih modela gustoće 30 kg/m ³ te uz visinu kalupa 150 mm.....	109
Slika 7.7 Odljevci uz kalup popunjen do visine 75 mm	110
Slika 7.8 Graf ovisnosti temperature i duljine uz upotrebu polistirenskih modela gustoće 12 kg/m ³ te uz visinu kalupa 75 mm.....	111
Slika 7.9 Graf ovisnosti temperature i duljine uz upotrebu polistirenskih modela gustoće 30 kg/m ³ te uz visinu kalupa 75 mm.....	112
Slika 7.10 Odljevci dobiveni uz upotrebu polistirena gustoće 20 kg/m ³	113
Slika 7.11 Graf ovisnosti temperature i duljine uz upotrebu polistirenskih modela gustoće 20 kg/m ³ te uz visinu kalupa 150 mm.....	115
Slika 7.12 Graf ovisnosti temperature i duljine uz upotrebu polistirenskih modela gustoće 20 kg/m ³ te uz visinu kalupa 75 mm.....	116

Tablica 2.1 Fizikalna svojstva ploče od pjenastog polistirena [3].....	28
Tablica 3.1 Rezultati ispitivanja kemijskog sastava kod lijevanja u konvencionalni kalup i lijevanja u puni kalup [3]	51
Tablica 3.2 Vrijeme hlađenja u kalupu ovisno o masi odljevka [3].....	53
Tablica 5.1 Veza između uzroka i posljedica kod lijevačkog odmetka [3].....	70
Tablica 5.2 Opisno prikazuje tipične greške pri lijevanju odljevaka u pijesak bez veziva. [3].....	71
Tablica 6.1 Kemijska svojstva [13]	83
Tablica 6.2 Tehnički podaci polistirena [13].....	85
Tablica 7.1 Prikaz livljivosti u L [mm] u ovisnosti o temperaturi za gustoću $\rho = 12 \text{ kg/m}^3$ i visinu kalupa od 150 mm	107
Tablica 7.2 Prikaz livljivosti u L [mm] u ovisnosti o temperaturi za gustoću $\rho = 30 \text{ kg/m}^3$ i visinu kalupa od 150 mm	107
Tablica 7.3 Prikaz livljivosti u L [mm] u ovisnosti o temperaturi za gustoću $\rho = 30 \text{ kg/m}^3$ i visinu kalupa od 75 mm	110
Tablica 7.4 Prikaz livljivosti u L [mm] u ovisnosti o temperaturi za gustoću $\rho = 12 \text{ kg/m}^3$ i visinu kalupa od 75 mm	111
Tablica 7.5 Prikaz livljivosti u L [mm] u ovisnosti o temperaturi za gustoću $\rho = 20 \text{ kg/m}^3$ i visinu kalupa od 75 mm	114
Tablica 7.6 Prikaz livljivosti u L [mm] u ovisnosti o temperaturi za gustoću $\rho = 20 \text{ kg/m}^3$ i visinu kalupa od 150 mm	114

POPIS OZNAKA

C	– sadržaj ugljika [%]
H ₂	– sadržaj vodika [%]
Fe ₂ O ₃	– sadržaj željeznog oksida [%]
SiO ₂	– sadržaj silicijevog dioksida [%]
Al ₂ O ₃	– sadržaj aluminijevog oksida [%]
H ₂ O	– sadržaj vode [%]
FeO	– sadržaj željeznog oksida [%]
CO ₂	– sadržaj ugljičnog dioksida [%]
CaO	– sadržaj kalcijevog oksida [%]

IZJAVA

Izjavljujem da sam diplomski rad izradio samostalno uz korištenje navedene literature te uz svestranu pomoć prof. dr. sc. Ivana Budića. Također izražavam zahvalnost djelatnicima Laboratorija za ljevarstvo i Laboratorija za alatne strojeve Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu koji su uvelike pomogli u praktičnom dijelu ovog rada.

FILIP ORŠIĆ

UVOD

1.1 Općenito o tehnologiji lijevanja

Ljevarstvo je tehnologija oblikovanja metalnih predmeta lijevanjem litine u kalupe kako bi se dobio konačan proizvod, odljevak. Sve proizvodne operacije potrebne da bi se od sirovine dobio odljevak obuhvaćene su tehnologijom lijevanja. Raznim postupcima lijevanja mogu se dobiti najzahtjevniji tj. najsloženiji oblici sa unutarnjim i vanjskim šupljinama. Ovakav pristup znatno olakšava strojogradnju. Neki dijelovi koji bi se morala sklapati od više dijelova sada se mogu odliti u jednom komadu. Lijevanje je najekonomičniji način proizvodnje (npr. za velika kućišta strojeva kompliciranih oblika), a posebno onda kada niti jedna druga tehnologija ne omogućava gotov proizvod poput dijelova sa unutrašnjim kanalima nepravilnog oblika. Za proizvodnju dijelova kompliciranih oblika u serijskoj proizvodnji, lijevanje je ekonomičnije od ostalih postupaka. Oblikovanje se vrši u tekućem stanju, a metal (litina), kao i sve tekućine, zahtjeva minimalni utrošak energije za promjenu oblika, pogotovo jer se kao uljevna sila najčešće koristi sila gravitacije. [1]

Utrošak energije za dobivanje konačnog proizvoda ipak je znatan jer materijal prethodno treba rastaliti. To je jedan od razloga zašto je lijevanje nezamjenjiva tehnologija kod izrade proizvoda složenih oblika. Lijevanje nam omogućuje iznimno visoku proizvodnost zbog kratkog trajanja skrućivanja odljevaka. Litina za vrijeme ulijevanja, skrućivanja i ohlađivanja na kalup djeluje mehanički, kemijski i toplinski. [2]

Za izradu kvalitetnih odljevaka potrebna je visoka razina znanja i umještosti. Naime čitav proces nije moguće vizualno pratiti jer se odljevak formira unutar zatvorenog kalupa. Upravljanje kvalitetom iznimno je složeno jer sam proces skrućivanja litine i promjene agregatnog stanja nije dovoljno istražen. Neki od zahtjeva su mehanička i dimenzijska svojstva odljevaka te neki drugi posebni zahtjevi. Proces lijevanja je kontinuiran, pa ga je teško u cijelosti kontrolirati, što ga svrstava u rizične tehnologije. To je razlog zašto se razvoj ljevarstva kreće u smanjenju rizika i iskorištenju mogućnosti visoke proizvodnje. [2]

1.2 Razvoj ljevarstva

Nakon što je čovjek otkrio metale, izradio peći za taljenje te pronašao prikladne materijale za izradu kalupa, lijevanje metala postalo je moguće. Najstariji materijal koji se oblikovao lijevanjem je bakar. Lijevanje bakra počelo je u trećem tisućljeću prije naše ere. Kako bakar ima loša ljevačka svojstva (visoko talište te sklonost otapanju plinova) ukazala se potreba za drugim materijalima. To je bila ljevačka bronca, kao znatno pogodniji ljevački materijal. Tehnologija lijevanja bronce osobito se razvila u starom vijeku. Iz toga vremena potječu mnogi upotrebn i umjetnički brončani odljevci. Topovske cijevi te različita oružja i oruđa i drugi predmeti lijevali su se od bronce u srednjem vijeku. Osim tehnike lijevanja bronce razvila se i tehnika lijevanja mjedi, u sredozemnom kulturnom području. Mjed je slitina bakra sa cinkom. Od mjedi su se proizvodili najčešće ukrasni predmeti, te se kasnije počela primjenjivati u strojogradnji. [1]

Kinezi su prije naše ere lijevali odljevke od sivog lijeva dok je u Europi proizvodnja počela tek u srednjem vijeku. Proizvodnja čeličnog lijeva nije bila moguća premda je čelik bio poznat već od ranije. Ugljena gnjecava željezna masa, tzv. *Nado* dobivala se izravno iz rude ispod vatre u ognjištima i niskim jamskim pećima. Ta masa se kasnije kovala. Tek većom dobavom zraka u jamskim pećima (zbog izgaranja) dobivena je litina na bazi željeza. Puhala na mehanički pogon vodom ili parom zamijenila su prirodni propuh i ručno puhalo. Na taj način omogućena je proizvodnja sivog lijeva. Usporedno morali su se poboljšati i materijali za izradu kalupa da bi odolijevali višim temperaturama lijevanja.

U 15.st. pojavljuju se prvi odljevci od sivoga lijeva u obliku topovskih kugli. Izumom peći za taljenje sirovog gvožđa tj. kad se litina nije više ulijevala u kalupe neposredno iz peći za taljenje rude počinje novo razdoblje u lijevanju sivog lijeva. Plamene peći koristile su se u 17. i 18. st., a krajem 19.st. kupolne peći (kupolke) u kojima je ljevač mogao taliti sirovo gvožđe, lomljevinu, željezne otpatke i drugo. Mijenjanjem pojedinih komponenti zasipa ljevač je mogao podesiti sastav litine te na taj način više nije bio ovisan o sirovom gvožđu iz visoke peći. [1]

Žarenje odljevaka bilo je poznato već početkom 17. st. Žarenjem odljevaka s bijelim lomom, koji je tvrd, krhak i neobradiv, dobivali su se žilavi odljevci. Tada je počela proizvodnja tvrdog lijeva i lijeva za izradu valjaka. Danas se u svrhu taljenja čeličnog lijeva koriste električne peći. Nekada se čelični lijev talio u grafitnim loncima. Izrada kalupa za takvo taljenje stvarala je određene poteškoće. [1]

Nakon zastoja koji je pratio sve djelatnosti u prvoj polovici srednjeg vijeka, duhovna renesansa značila je i proizvodnu, pa ljevarstvo daje proizvode interesantne za javne, državne i crkvene potrebe. Ljevarstvo je tehnologija namijenjena velikom broju korisnika, zbog mogućnosti izrade velikog broja replika pomoću modela. Neriješen problem mehaničke energije diktirat će orijentaciju prema pojedinačnoj proizvodnji. Do kraja 19.st. ljevarstvo je bila individualna *state of art* proizvodnja gdje je dominirao jedan majstor. Sve do kraja 20.st. ljevarstvo se neće osloboditi veze *pojedinaac-majstor-inženjer*. [1]

Problem mehaničke energije razriješen je industrijskom revolucijom. Pogodnost ljevarstva za serijsku proizvodnju doći će do izražaja naglim porastom populacije. Intenzivna mehanizacija, uglavnom na mehaničkim principima, dovest će do povećanja proizvodnosti, ali i do vrlo teških radnih uvjeta, prašine, buke i povišene temperature. Efikasna industrijska kontrola kvalitete nije moguća zbog nedostatka neadekvatnih instrumenata premda su odljevci iznimno dobri, a temeljna saznanja o metalurgiji su formulirana. Početkom 20.st. došlo se do saznanja da je proizvodnju bolje temeljiti na visokosofisticiranim strojevima nego na visokvalificiranim *radnicima-majstorima*. Stručna snaga potrebna je u pripremi proizvodnje, alatnici i održavanju. Ovakvim načinom došlo je do visoke mehanizacije proizvodnih linija baziranih na treskalicama. Kemijska energija još uvijek se primarno koristi za taljenje, bez obzira na široku upotrebu električne energije. [2]

Zbog sve većeg pritiska u vidu ujednačene kvalitete, visoke dimenzijske točnosti, radnih uvjeta i ekoloških uvjeta većina ljevaonica nije bila u mogućnosti pratiti taj ritam. Zarada je bila nemoguće te dolazi do propadanja ljevaonica sredinom 20.st. Zadovoljavajuća rješenja nisu postiziva zbog tehničkih uvjeta koji vladaju u ljevaonicama. S obzirom na nemogućnost prilagodbe starih, grade se nove, moderne ljevaonice. Treskalica je izbačena zbog ograničenja uzrokovanih bukom, a zamjena dolazi u obliku visokotlačne automatske pritiskalice iznimno visoke proizvodnosti.

Krajem 20.st. ljevarstvo se izjednačilo sa ostalim tehnologijama u vidu proizvodnih i ekoloških uvjeta. Jedan od čimbenika je uvođenje elektronike koja omogućuje korištenje indukcijskih peći za taljenje. Upotreba kemijski očvrstivog veziva u potpunosti eliminira probleme pojedinačne proizvodnje te su kalupilice radi sabijanja kalupa izbačene iz upotrebe. Postignuta je visoka fleksibilnost kako u pojedinačnoj proizvodnji tako i na automatskim kalupnim linijama. [2]

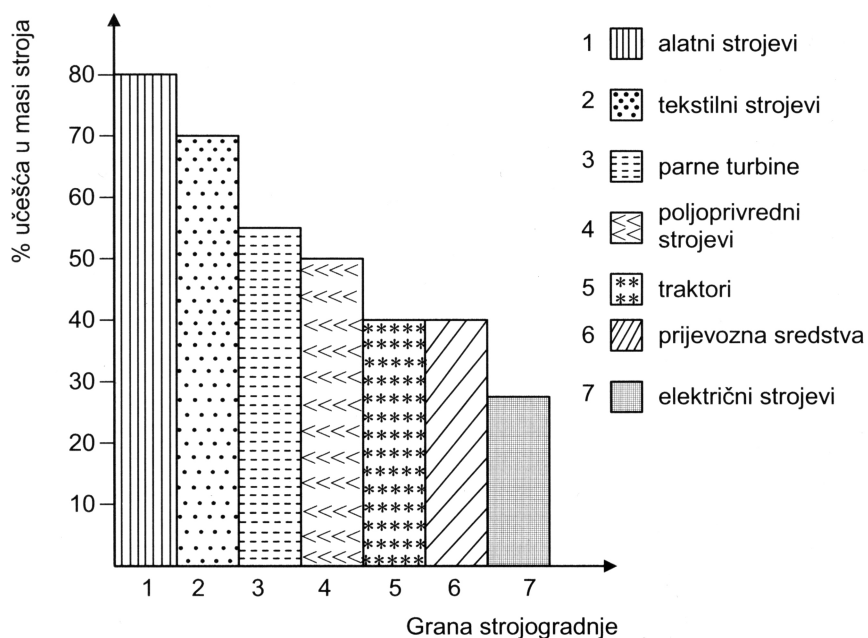
Glavne aktivnosti na unapređivanje tehnologije lijevanja biti će usmjerene na upravljanje kvalitetom. To ne znači da se ljevačka tehnologija neće unapređivati i na druge načine kao što je impulsna tehnika sabijanja kalupa, lijev sa modelima od polistirena, usmjereno skrućivanja radi dobivanja optimalnih mehaničkih svojstava, odljevci od monokristala i dr. Ljevarstvo prestaje biti rizična proizvodnja upotrebom računala i mikroelektronike. To će omogućiti direktno upravljanje proizvodnim procesom što do sada nije bilo moguće ostvariti. Rezultat su odljevci visoke dimenzijske točnosti, tanjih stijenki, i zagarantirane kvalitete. Doći će do stanovitog prestrukturiranja u ljevačkoj proizvodnji. Povećat će se proizvodnja odljevaka od aluminijskog i nodularnog lijeva, a smanjiti proizvodnja sivog, kovkastog i čeličnog lijeva. Dolazi i do pojave novih materijala kao što su polimeri, keramika, polimerni beton, kompoziti i sl. No ne treba očekivati da će ovi materijali zamijeniti metale, premda će se pojaviti konstrukcije u kojima će oni biti korišteni. Svojstva tih materijala nisu konkurentna, nego u većem slučaju komplementarna. [2]

Danas proizvedeni odljevci imaju iznimno visoku kvalitetu oblika, dimenzija i svojstava te vrlo fleksibilne rokove isporuke. Sve to je omogućilo sofisticirano vođenje proizvodnje. Zahtjevi u pogledu mehaničkih svojstava porasli su u zadnjih dvadeset godina čak 60 %, a točnost dimenzija poboljšana je čak pet puta. Broj dijelova strojnih sklopova smanjen je lijevanjem vrlo složenih odljevaka. Uvođenjem tehnika konstruiranja u vidu CAD/CAM povisit će kvalitetu odljevaka. Ljevačka proizvodnja količinski raste, uz manji pad u industrijski razvijenim zemljama, ali dolazi do 25 % povećanja u zemljama koje su u industrijskom razvoju. Tako je ukupna ljevačka proizvodnja porasla sa oko 80 Mt do oko 120 Mt. [2]

Ljevaonice u zapadnim zemljama su i u pojedinačnoj i u serijskoj proizvodnji visokomehanizirane ili automatizirane. Peći za taljenje u pravilu su električne indukcijske peći. Kalupljenje se odvija na kalupnim linijama. Proizvodnost odljevaka je visoka. Linije proizvode od 150 do 200 kalupa na sat.

Zemlje u tranzicije u koje spada i Republika Hrvatska, nastoje proizvodnju prilagoditi tržišnim uvjetima privređivanja. Morati će doći do restrukturiranja vrsta ljevova u proizvodnji. Smanjenjem proizvodnje sivog lijeva i čeličnog lijeva te povećanjem proizvodnje nodularnog i aluminijskog lijeva. Posebnu pozornost treba posvetiti poboljšanju kvalitete odljevaka što dakako povlači za sobom modernizaciju kontrolnih instrumenata. Nadalje, biti će potrebno kontrolirati kemijski sastav, dimenzijsku točnost, mehanička svojstva te poboljšati upravljanje i smanjiti broj zaposlenih. [2]

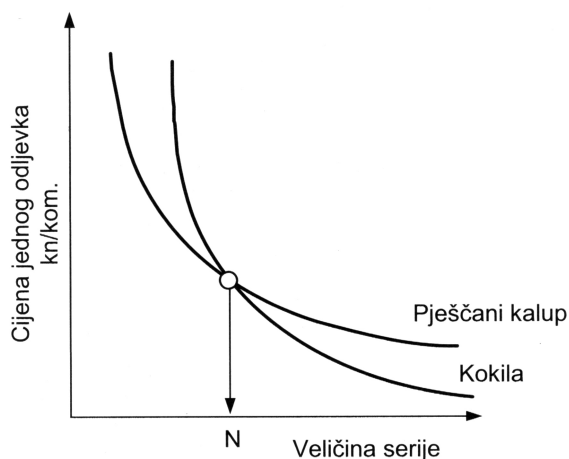
Histogram na slici 1.1 prikazuje zastupljenost odljevaka u širokom asortimanu strojogradnje bez obzira na tehnologiju proizvodnje. [2]



Slika 0.1 Učešće odljevaka u masi stroja nekih grana strojogradnje [3]

Histogram prikazuje % učešća o masi stroja u odnosu na granu strojogradnje. Najveće učešće u masi stroja (čak 80 %) je kod alatnih strojeva, a najmanje kod električnih. Kod traktora i prijevoznih sredstava učešće odljevaka u masi je 40 %. S obzirom na velike proizvodne serije, proizvodnja odljevaka za ove grane strojogradnje je značajna.

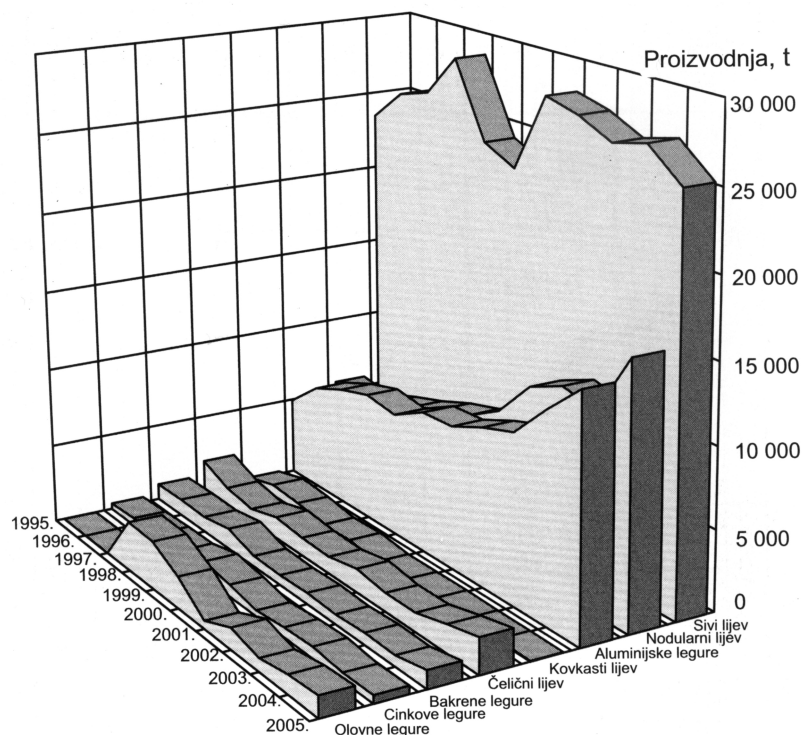
Kod serijske i masovne proizvodnje, jeftinije je lijevati u kokile. Tj. prelazi se na tzv. kokilni lijev. Kod pojedinačne proizvodnje ili malih serija (do 1000 komada) isplativost je na strani pješčanog lijeva. (sl. 1.2). [2]



Slika 1.2 Ovisnost cijene odljevka o veličini serije [2]

Od 1990. do 1995. godine u Republici Hrvatskoj uglavnom se bilježi pad ili stagnacija proizvodnje pojedinih vrsta odljevaka. iako su potrebe za odljevcima velike. Kretanje proizvodnje odljevaka u razdoblju od 1995. do 2005. godine prikazano je na (sl. 1.3), a indeksi proizvodnje na (sl. 1.4).

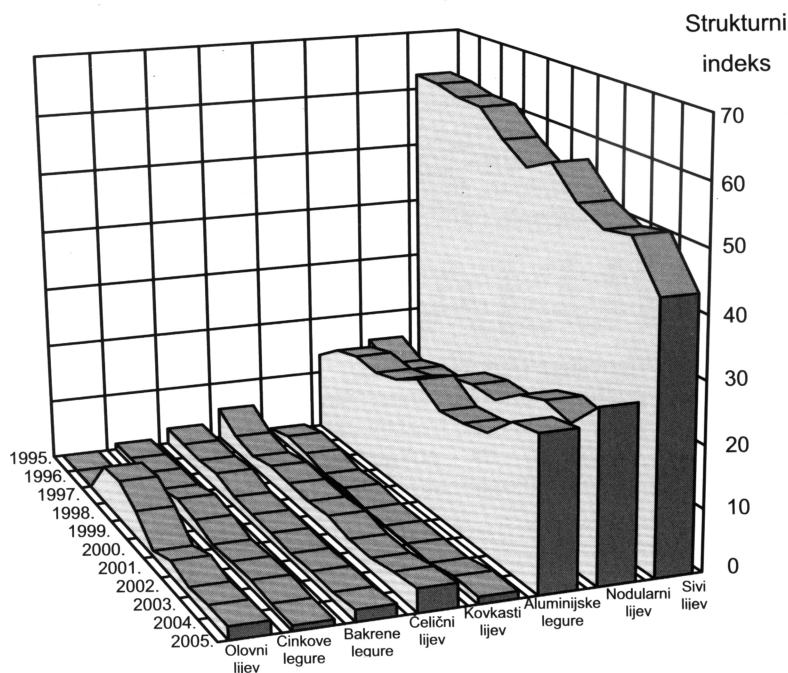
Do pada tj. stagnacije proizvodnje pojedinih vrsta odljevaka (u razdoblju od 1995. do 2005. godine) dolazi do ranije spomenutih problema zemalja u tranziciji kao što je Republika Hrvatska.



Slika 1.3 Prikaz ljevačke proizvodnje u R. Hrvatskoj od 1995. do 2005. god. [3]

Zabilježen je pad proizvodnje odljevaka od sivog i čeličnog lijeva uz rast proizvodnje odljevaka od nodularnog lijeva. Iznimka je porast proizvodnje odljevaka od aluminijских legura. Nodularni lijev uspješno zamjenjuje odljevke od sivog i čeličnog lijeva zbog svojih mehaničkih svojstava.

Slika 1.3 prikazuje ukupnu godišnju proizvodnju pojedinih vrsta ljevova u razdoblju od 1995. do 2005. godine. Na ovaj način nije moguće u potpunosti predvidjeti buduću proizvodnju odljevaka. Ovi pokazatelji, dakako, jesu važni ali su isto tako nepotpuni za predviđanje buduće proizvodnje. Visoku važnost pridajemo procjeni buduće proizvodnje iz nekoliko razloga. Na temelju poznavanje buduće strukture lako ćemo procijeniti odvijanje buduće proizvodnje. Ovo je nadasve bitno jer zatim možemo ustvrditi potrebu za eventualnim rekonstrukcijama ljevaonica (zamjena kupolnih peći indukcijskim pećima), ili za izgradnjom novih ljevaonica.



Slika 1.4 Struktura ljevačke proizvodnje u R. Hrvatskoj od 1995. do 2005. god. [3]

Broj koji pokazuje promjenu u odnosu na prošlu godinu za određene vrste lijeva naziva se strukturni indeks ljevačke proizvodnje. Za osnovicu se uzima prošla godina, a analizira se određeno vremensko razdoblje.

Slika 1.4 pokazuje kako je struktura različita od one u industrijski razvijenim zemljama. Tj. iznimno je slična strukturi proizvodnje u istočnoeuropskim zemljama. Karakterizirana je izuzetnim udjelom sivog lijeva i u apsolutnom i u relativnom odnosu na nodularni lijev. Kako bismo pratili razvoj i strukturu zapadnih zemalja bilo bi potrebno unijeti neke promjene u strukturi. Bilo bi potrebno smanjiti relativni udio sivoga lijeva za oko 30 %, a povećati relativni udio nodularnog lijeva za oko 50 %. Industrijski razvijene zemlje održavaju odnos između sivog i nodularnog lijeva u omjeru 2 : 1.

S obzirom na povećano korištenje aluminijskog lijeva u automobilske proizvodnji, u svrhu lijevanja blokova motora i dr., proizvodnju je moguće povećati za oko 50 %.

U industrijski razvijenim zemljama proizvodnost iznos od 30 do 65 tona lijeva po zaposlenom, dok se u Republici Hrvatskoj ta brojka kreće oko 7 tona po zaposlenom.

Možemo zaključiti da u Republici Hrvatskoj treba zacrtati prioritetne pravce razvoja te će za uspješno poslovanje biti potrebno poduzeti određene aktivnosti.

- poboljšanje kvalitete odljevaka (poboljšanje stručnog znanja zaposlenika, nabavka kontrolnih instrumenata, primjena informatičkih sustava)
- usvajanje novih tehnologija, posebno nodularnog lijeva
- specijalizacija u određenim segmentima proizvodnje
- strojna obrada odljevaka kako bi se isporučivali gotovi dijelovi i proizvodi
- izvoz manjih serija i pojedinačna proizvodnja
- organizirano rješavanje zajedničkih problema kroz poslovno udruživanje ljevaonica
- financijska podrška izvozu
- poboljšanje pristupa i protoka tehnoloških informacija
- poboljšanje sigurnosti u radu i zaštiti okoliša
- pokazatelj uspješnosti nije fizički opseg proizvodnje nego profitabilnost.

1.3 Razvoj lijevanja u pune kalupe

Za izradu ovakvih kalupa najčešće se koriste pjenasti polistirenski modeli koji se ne vade iz kalupa, nego u njemu ostaju za vrijeme lijevanja litine. Litina popunjava kalupnu šuplinu uz rasplinjavanje polistirenskog modela te nakon skrućivanja dobijemo odljevak. Prilikom ovakve vrste lijevanja moguća je primjena jednodijelnih kalupa premda se u ljevarstvu najčešće koriste dvodijelni i višedijelni kalupi. Polistirenski modeli širu primjenu nalaze početkom 60-ih godina 20. stoljeća, a zatim se njihova primjena u pojedinačnoj proizvodnji vrlo brzo širi po svijetu. Istraživanja H. F. Shroyera 1956. godine, pokazala su da se pjenasti polistiren lako obrađuje, te da se pjenjenjem (ekspandiranjem) može oblikovati u modele. 1958. godine ovom tehnologijom lijevani su prvi kipovi, a rezultati objavljeni dvije godine kasnije. Nakon širenja ovih rezultata po svijetu dolazi do sve veće primjene ove tehnologije u serijskoj proizvodnji odljevaka od lakih i željeznih legura. Ova tehnologija našla je primjenu pri lijevanju velikih pojedinačnih odljevaka kao što su alati za prešanje u automobilske industriji ili u proizvodnji različitih strojeva. Neki od razloga su, bitno smanjenje utška radnoga vremena i materijala.

Istovremeno su obavljani pokusi i rasprave o prikladnosti postupka lijevanja u pune kalupe uz upotrebu pijeska bez veziva za velike serije odljevaka.

Daljnja istraživanja lijevanja u pune kalupe upotrebom pijeska bez veziva, kao i postupkom magnetskog kalupljenja, opisana su u patentima H. Nellen 1960., T. R. Smitha 1964., R. Hoffmana 1966., te postupak lijevanja u pune kalupe uz podtlak prema E. M. Krzyzanowskom 1968. godine, koji iskorištavaju magnetsko polje, odnosno vanjski tlak zraka za sabijanje (učvršćivanje) kalupa.

Od početka 60-tih godina na razvoju i širenju postupaka lijevanja u pune kalupe intenzivno se angažirao A. Wittmoser, u suradnji s jednom industrijskom tvrtkom koja je preuzela prava H. F. Shroyera. Industrijska serijska proizvodnja dijelova od lijevanog željeza s polistirenskim modelima postala je najprije poznata zahvaljujući magnetskom kalupljenju. Serijska proizvodnja odljevaka tehnologijom lijevanja u pune kalupe počela je 1975. godine, lijevanjem benzinskih separatora u Japanu.

Veći interes za serijsku i masovnu proizvodnju odljevaka uz primjenu tehnologije lijevanja u pune kalupe pojavio se u nekim zemljama sredinom 70-ih godina. Intenzivan razvoj pokrenut je od strane velikih tvrtki i stručnih institucija. Na nekoliko pokusnih postrojenja u SAD i Europi provedena je serijska i masovna proizvodnja, osobito za lijevanje aluminijskog i željeznog lijeva. Seminari o tehnologiji lijevanja u pune kalupe održavaju se krajem 80-ih godina u Francuskoj, Velikoj Britaniji, Njemačkoj i SAD. Ispitivanje lijevanja aluminijskih legura u pune kalupe započela je tvrtka Ford Motor Co. u SAD 1974. godine. Na probnom postrojenju u Kanadi, izgrađenom 1980. godine proizvedeno je 25 000 ispušnih grana godišnje. Nakon toga 1984. godine instalirano je automatsko proizvodno postrojenje vrijedno 11 milijuna dolara. Proizvodnost je 180 kalupa na sat uz proizvodnju preko milijun ispušnih grana godišnje.

U tvrtki Ford Motor Co. tada postoji postrojenje za pokusnu proizvodnju pumpi za vodu, disk kočnica, grana za ispušne plinove i šupljih bregastih osovina.

U General Motorsu 1982. godine, pušteno je u pogon potpuno automatizirano postrojenje za proizvodnju cilindarskih glava za diesel motore.

U Italiji 1979. godine započinje lijevanje u pune kalupe različitih automobilskih dijelova od aluminijskih i željeznih legura.

Intenzivni razvoj u Francuskoj ima težište na lijevanju dijelova za automobilsku industriju korištenjem tehnologije lijevanja u pune kalupe. Tvrtke Peugeot i Citroen razvijaju način lijevanja blokova motora od željeznih legura.

I u Njemačkoj se niz tvrtki bavi serijskom proizvodnjom odljevaka lijevanjem u pune kalupe. Neke tvrtke su Opel, BMW i Mercedes.

Tehnologija lijevanja u pune kalupe zaživjela je i u ostatku svijeta. Tako se uspješno primjenjuje u Japanu, Koreji i Kini.

Kod nas nije organizirana značajnija proizvodnja odljevaka lijevanjem u pune kalupe. Postoje pojedinačni pokušaji lijevanja rezervnih dijelova, kod kojih bi izrada trajnog modela bila preskupa. [3]

1.4 Primjeri odljevaka lijevanih u pune kalupe

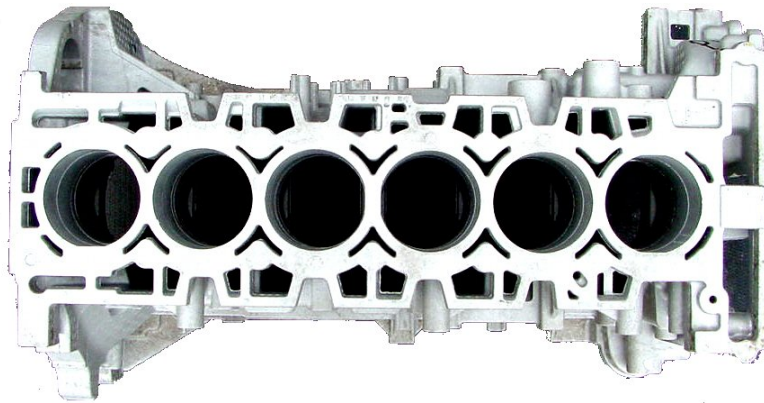
Ovdje su prikazani razni odljevci dobiveni korištenjem tehnologije lijevanja u pune kalupe.

Na (sl. 1.5) [4] prikazan je dio mača odljeven ovom tehnologijom.

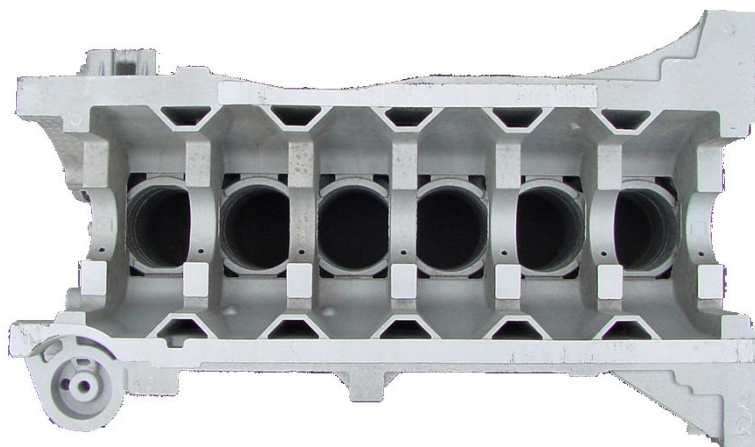


Slika 1.5 Dio mača [4]

Na (sl. 1.6 ... 1.7) prikazan je blok motora. [5]

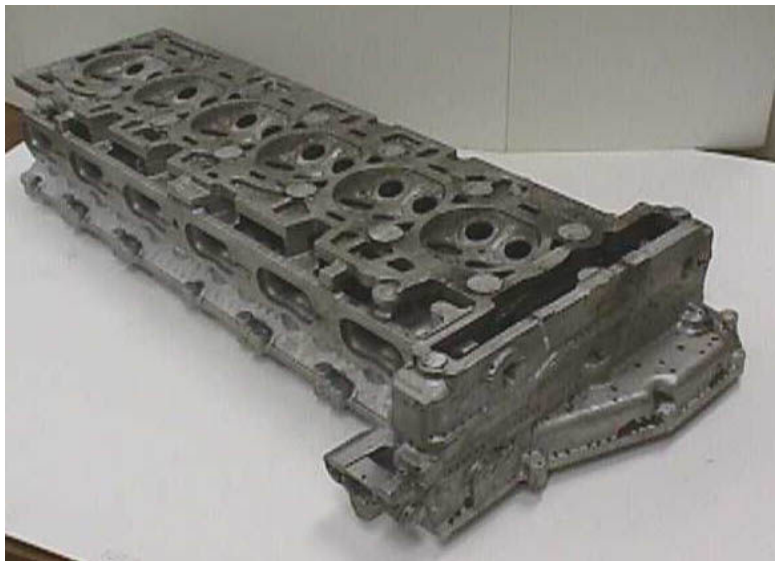


Slika 1.6 Blok motora [5]



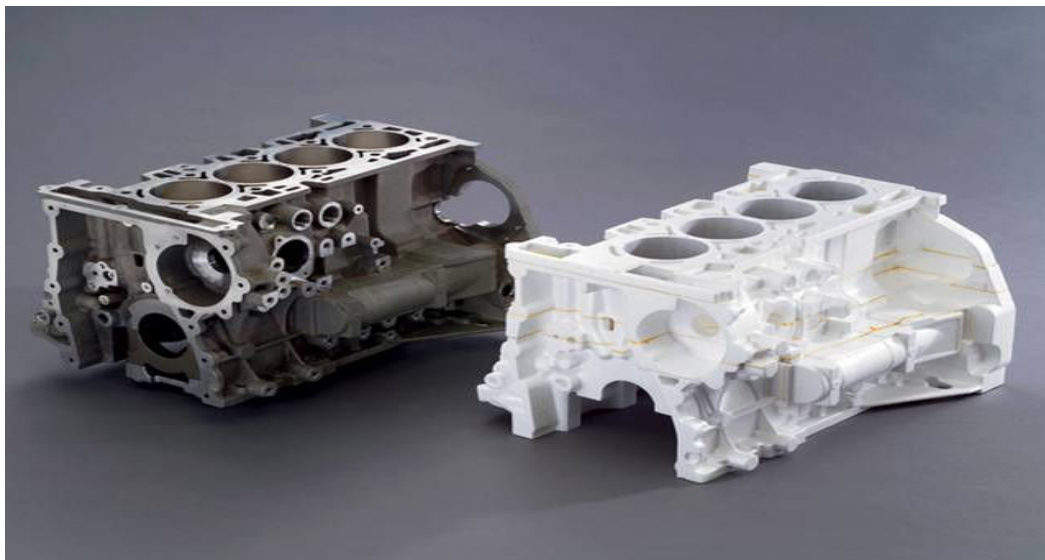
Slika 1.7 Blok motora [5]

Na (sl. 1.8) prikazana je cilindarska glava motora tvrtke *GM*. [6]



Slika 1.8 Cilindarska glava [6]

Na (sl. 1.9) prikazan je blok motora tvrtke *GM* [7].



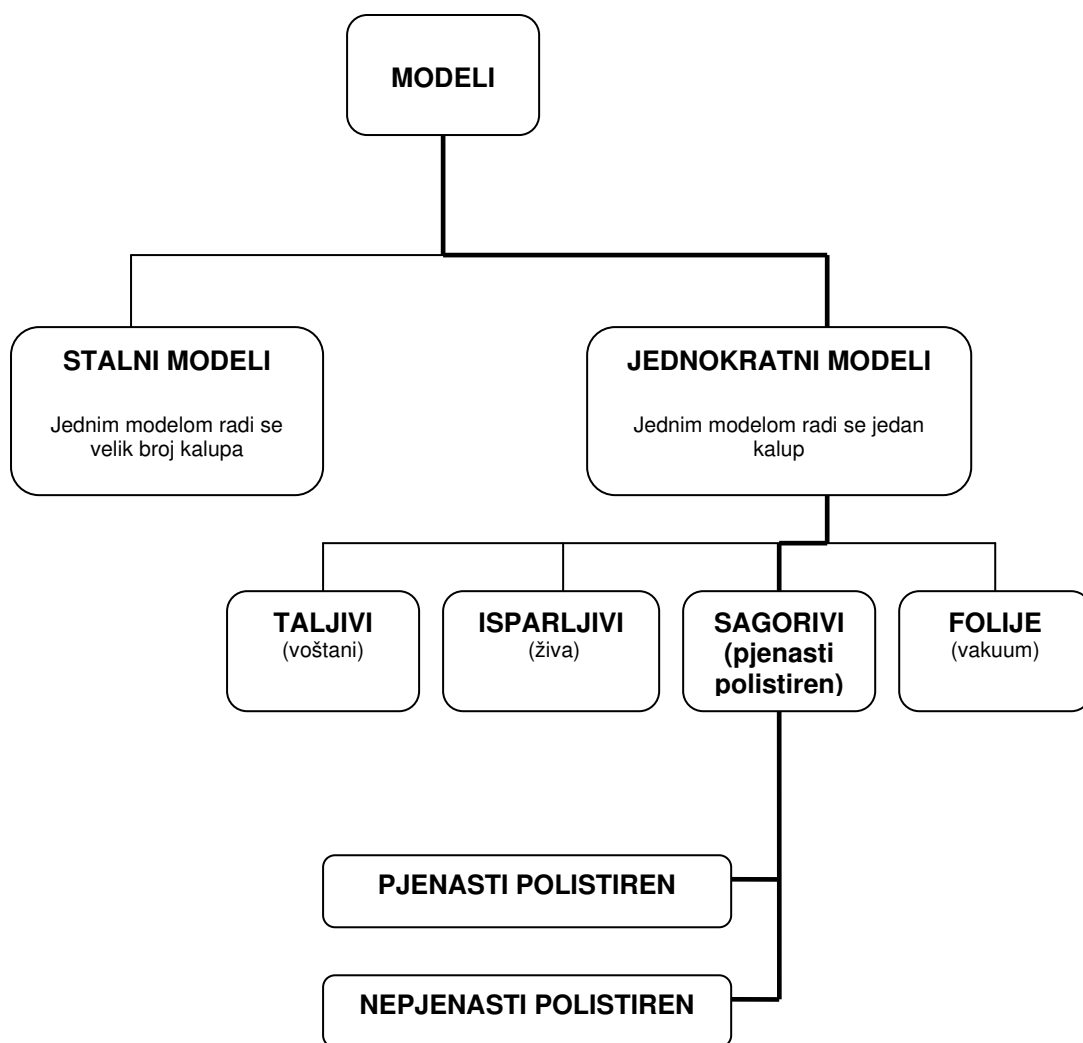
Slika 1.9 Blok motora tvrtke GM [7]

2. VRSTE MODELA

Model je alat koji služi za oblikovanje kalupne šupljine. U modelni komplet ubrajaju se jezgrenici i različite šablone kojima se omogućuje pravilna izrada kalupa. O dimenzijskoj točnosti modela, jezgrenika i šablona ovisi i točnost odljevka. Modelni komplet najčešće čini znatnu stavku u cijeni odljevka. Modeli se izrađuju različitim tehnologijama od različitih materijala. Izbor modela ovisi o dimenzijama odljevka, masi odljevka, veličini serije, vrsti legure za lijevanje, kalupljenju i dr. Modeli mogu biti stalni i jednokratni. Stalni se dijele na šablone i prave modele, dok se jednokratni dijele prema vrsti materijala koji se upotrebljava za model na:

- taljivi modeli (vosak)
- isparljivi modeli (živa)
- sagorivi modeli (pjenasti polistiren)
- folije (vakuum)

Na (sl. 2.1) vidi se šematski prikaz podjele modela.



Slika 2.1 Shematski prikaz podjele modela

Osim prethodno navedenih materijala za izradu modela, kao materijali još se mogu koristiti, drvo, različiti željezni materijali, lako obojeni materijali, umjetna smola, gips, cement kao i neki kompozitni materijali.

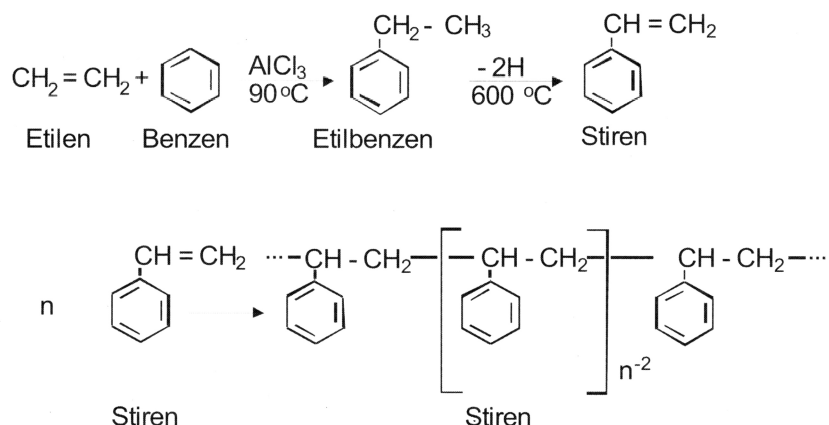
Na shematskom prikazu sa (sl. 2.1) uviđa se da su deblje napisani sagorivi modeli. Za izradu sagorivih modela upotrebljava se pjenasti polistiren, a takvi modeli koriste se pri lijevanju u pune kalupe.

2.1 Sagorivi modeli

Za lijevanje u pune kalupe upotrebljavaju se modeli izrađeni od pjenastog (ekspandiranog) polistirena. Polistiren se može rezati tankom zagrijanom žicom ili tračnom pilom. Ako je model izrađen od više dijelova, potrebno je dijelove lijepiti posebnim ljepilima. Cijena izrade takvog modela znatno je niža od npr. drvenog. U nastavku slijedi detaljniji opis materijala za izradu modela. Da bi pojmovi bili jasni, treba upozoriti na činjenicu da termin «model» obuhvaća sve dijelove koji služe za pripremu kalupne šupljine, predviđene za punjenje litinom. To znači da su u takvu definiciju uključeni ne samo dijelovi za uljevni sustav, nego šablone i dr.

Ljevaonice koje proizvode točni lijev i npr. umjetničke slike, često se odlučuju za termoplastični polistiren kao materijal za izradu modela kod lijevanja u pune kalupe. Izvanredno glatka površina i visoka krutost injekcijski prešanih polistirenskih modela gustoće 1100 kg/m^3 olakšavaju proizvodnju preciznih odljevaka s visokom kakvoćom površine i uskim tolerancijama. Izrada manje preciznih odljevaka na osnovu polistirenskih modela također je isplativa.

Polistiren je ugljikovodik koji se sastoji od 92 % C i 8 % H₂. Proizvodi se polimerizacijom monomernog stirena. Tehnička proizvodnja monostirena s vrelištem pri 146 °C, zasniva se na reakciji između benzena i etilena (sl. 2.2). [3]



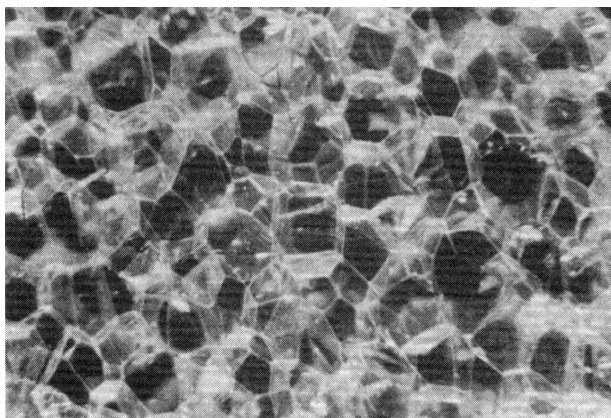
Slika 2.2 Proizvodnja polistirena [3]

Proces je poznat kao Friedel - Craftsova reakcija adicije etilena na benzen uz aluminijev klorid kao katalizator, koji daje međuprodukt etilbenzen. On se katalitički dehidrogenizira uz visoku temperaturu, pri čemu nastaje monomerni stiren. Iz tog se spoja polistiren dobiva bilo u obliku čvrstog bloka, bilo kao polimerizat otopljen u organskom otapalu, bilo kao vodena suspenzija polimerizata. Pritom se postižu relativne molekularne mase između 200 000 ... 800 000, zbog čega se rastaljeni polistiren može ekonomično preraditi injekcijskim prešanjem u različite profilirane dijelove kao što su polistirenski sagorivi (rasplinjivi) modeli za lijevanje u pune kalupe.

Međutim, za lijevanje u pune kalupe može se primijeniti jedino pjenasti polistiren, koji će se pri ulijevanju litine rasplinuti. Kao sredstvo za pjenjenje polistiren obično sadrži pentan, a ponekad i neke druge dodatke koji utječu na rasplinjavanje. Polistiren dolazi na tržište u obliku kuglica (granula) promjera 2 ... 5 mm i sadrže 5 ... 8 % pentana. U pravilu manje kuglice bolje ispunjavaju alat te daju glađu površinu modela. Polistirenske kuglice su prikladne za skladištenje u metalnim spremnicima do 6 mjeseci. Količina plina koji se razvija pri rasplinjavanju nepjenastih polistirena bila bi prevelika pa plin ne bi mogao dovoljno brzo izaći iz kalupne šupljine, te se takvi materijali ne mogu koristiti za izradu modela u tehnologiji lijevanja u pune kalupe.

Da bi se postiglo pjenjenje polistirena moraju se tijekom suspenzijske polimerizacije monomernog stirena u zrna koja pritom nastaju, uključiti organski spojevi s niskim vrelištem (metilenklorid, ugljikovodici s niskim vrelištem kao pentan). Taj polistirenski materijal, koji ima gustoću između 1010 i 1100 kg/m³ i može ekspanzirati, dajući pri temperaturi 90 do 105 °C plastičnu pjenu s jednoličnom staničnom strukturom. Istodobno s nastankom pjene i odgovarajućim porastom volumena raste i unutarnji tlak, pa se zrna međusobno zavaruju tako da se oblikuje kompaktan produkt. Gustoću komercijalno dostupne polistirenske pjene moguće je izabrati prema potrebi, a kreće se od 10 do 300 kg/m³.

Činjenica da 10^{-6} m^3 pjenastog polistirena sadrži 10 000 zatvorenih pojedinačnih stanica (sl. 2.3) daje predodžbu o staničnoj strukturi takve pjene. Zbog te strukture pjenasti polistiren sadrži volumenski oko 2 % čvrste tvari.



Slika 2.3 Stanična struktura pjenastog polistirena [3]

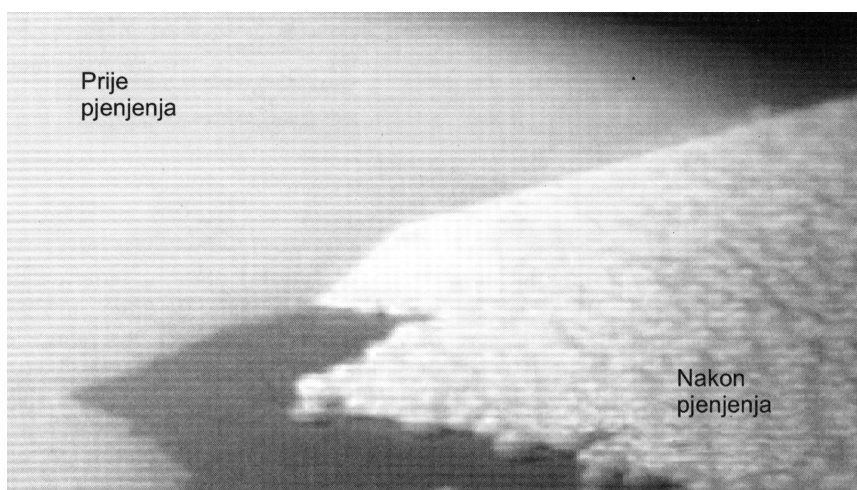
Fizikalna svojstva ploče od pjenastog polistirena gustoće 20 kg/m^3 prikazana su u (tabl. 2.1).

Tablica 2.1 Fizikalna svojstva ploče od pjenastog polistirena [3]

Svojna čvrstoća	0,3 do 0,35 MPa
Udarna čvrstoća	0,02 do 0,04 MPa
Udarna čvrstoća uz utor	0,01 do 0,02 MPa
Tlačna čvrstoća	0,09 do 0,11 MPa
Vlačna čvrstoća	0,22 do 0,34
Smična čvrstoća	11 do 15 MPa
Temperaturna postojanost	70 do 80 °C
Propusnost za vodenu paru	0,38 g/(m ² h)
Dielektrična konstanta	1,05 uz 1 000 Hz
Faktor disipacije	0,0002 uz 10 000 Hz
Koeficijent toplinske vodljivosti	
pri - 50 °C	63 J/(mhK)
pri 0 °C	113 J/(mhK)
pri + 50 °C	159 J/(mhK)

Za oblikovanje modela od pjenastog polistirena na odgovarajućim strojevima koriste se posebni, vrlo točno izrađeni, alati za pjenjenje i to obično od aluminija debljine 8 do 10 mm. Osim strojnom obradom mogu se alati za pjenjenje jeftinije oblikovati elektrolitičkim izlučivanjem metala (galvanoplastički).

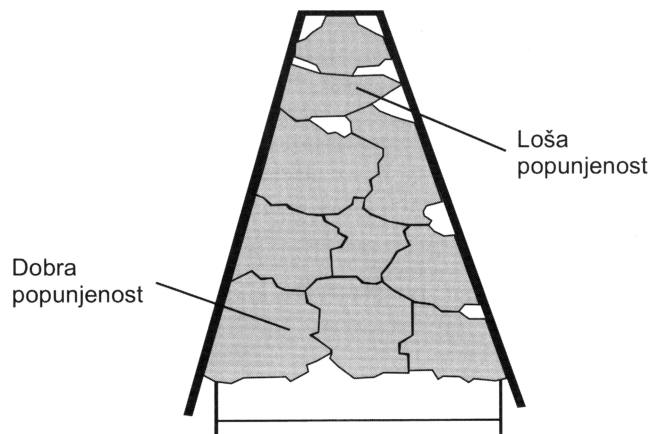
Zbog tražene toplinske vodljivosti alata, svakako treba dobiti samonosivu, kompaktnu metalnu stijenku ravnomjerne debljine. U alatima za pjenjenje polistirenske kuglice opet omekšavaju pod utjecajem topline tako da popune alat, a moraju i međusobno srasti. Oblikovanje alata za pjenjenje ovisi o predviđenom postupku za proizvodnju modela. Toplina se obično dovodi strujanjem vodene pare od 110 do 120 °C kroz kalup za pjenjenje. Neposredno nakon posljednjeg širenja i srašćivanja, model se radi učvršćivanja u kalupu hladi vodom od oko 50 °C (ili zrakom). Na (sl. 2.4) [3] prikazan je oblik zrna polistirena prije i nakon pjenjenja u kalupu.



Slika 2.4 Oblik zrna polistirena prije i nakon pjenjenja u kalupu [3]

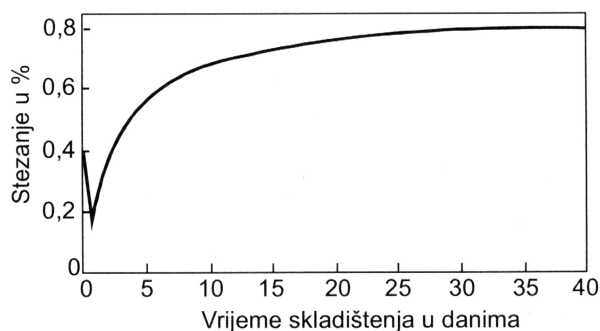
Na (sl. 2.4) vidi se da su prije pjenjenja kuglice polistirena manje od završenog pjenjenja (došlo je do srašćivanja – zavarivanja kuglica polistirena). Radi postizanja dovoljne gustoće polistirenskog modela (dobrog srašćivanja – zavarivanja kuglica), potrebno je da srastu najmanje tri kuglice zajedno. To ujedno znači da kuglice polistirena moraju biti manje od 3 mm.

Prikaz na (sl. 2.5) [3] ukazuje kako je alat pri vrhu nepopunjen polistirenom, jer nije došlo do srašćivanja najmanje tri kuglice polistirena zajedno (šupljina alata jednaka ili manja od 3 mm).



Slika 2.5 Prikaz nepopunjenosti alata polistirenom pri vrhu [3]

U odnosu na kalup za pjenjenje, stezanje modela neposredno poslije izbacivanja iznosi od 0,4 do 0,5 %. Nakon početnog širenja modela za 0,2 do 0,4 % tijekom prvih sati poslije izrade, opet dolazi do stezanja koje vrlo polako jenjava, tako da ono na kraju postupka može doseći do 0,8 % odstupanja izmjera u odnosu na kalup za pjenjenje (sl. 2.6) [3]



Slika 2.6 Tijek stezanja pjenastih modela od polistirena nakon izbacivanja iz kalupa za oblikovanje (pjenjenje) [3]

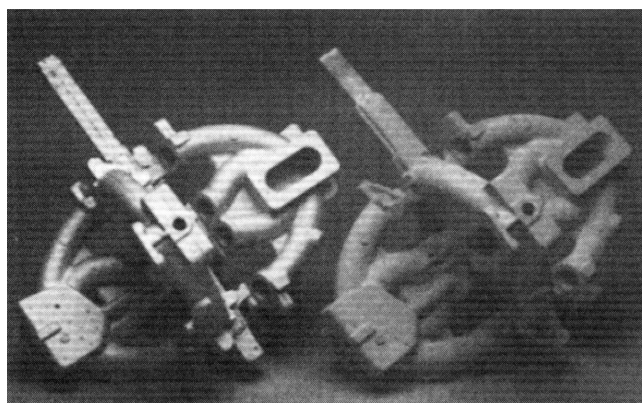
Prema opsežnim ispitivanjima [3] stezanje teče (prije svega), sukladno smanjenju sadržaja pentana u modelu. Postoje različita mišljenja o tome, treba li se sama ljevaonica baviti izradom modela kako bi nadzirala čitav proizvodni proces ili bi ih trebala kupovati od specijaliziranih proizvođača. Postoji mišljenje da bi za osrednje serije trebala biti povoljnija kupnja modela, kao i razmišljanja da bi umjesto izrade jezgri koja otpada, trebalo uvesti izradu modela u vlastitoj režiji. Pri lijevanju u ljevaonicama automobilske industrije, susreće se djelomice vlastita proizvodnja modela, a djelomice nabava izvana za velike serije odljevaka.

Kada se odlučuje o načinu proizvodnje modela od pjenastog polistirena, najprije se mora utvrditi treba li proizvesti samo mali broj pojedinačnih modela ili se razmatra masovna proizvodnja istovjetnih dijelova. Pojedinačni modeli za reparaturne radove i za izradu prototipova, kao i modeli za ograničene serije, izrađuju se rezanjem iz blokova dimenzija od 0,5 m visine do 1,0 m širine te do 3,5 m dužine kako je prikazano na (sl. 2.7) [8].



Slika 2.7 Pjenasti polistirenski blok [8]

Osim toga, moguće je brzo (praktički bez dodatnog vremena za montažu) slijepiti manje elemente posebnim ljepilom koje nije agresivno prema polistirenu, čime se oblikuje željeni model (sl. 2.8) [3].



Slika 2.8 Modelni grozd od pjenastog polistirena za lijevanje ispušnih grana automobila [3]

Ovaj način rada upotrebljava se u serijskoj proizvodnji odljevaka. Dakle, manji modeli lijepe se ljepilom u grozdove (kao voštani grozdovi kod točnog lijeva).

Pritom treba paziti da nastala cjelina (polistirenski grozd), bude što otpornija prema izobličenju s obzirom na razlike u gustoći između pjenastog polistirena, kalupnog materijala i metala koji se lijeva. Izbor i nanošenje ljepila delikatan je zadatak. Osim čvrstog povezivanja dijelova modela, ljepilo mora zabrtviti lijepljene plohe prema vani, da bi se sa sigurnošću spriječilo prodiranje pijeska i eventualno pojava mogućih grešaka. Budući da se ljepilo mora raspliniti po mogućnosti bez ostatka, sloj ljepila ne bi smio biti deblji od 0,1 mm. Zato pri konstruiranju treba voditi računa i o tome da plohe za lijepljenje budu prikladno smještene, kako bi se na jednostavan način ljepilo moglo ravnomjerno nanijeti. Za ravnomjerno, pouzdano i brzo lijepljenje u serijskoj se proizvodnji upotrebljavaju mehanički ili automatski uređaji (roboti).

Elementi uljevnog sustava: čaška, spust, razdjelnik, razvodnik, ušća, itd., izrađuju se odvojeno. Oni se najprije lijepe međusobno, a zatim se na takav uljevni sustav lijepe modeli. Čak i uz pažljivo lijepljenje, kvalitetna izrada modela od pjenastog polistirena može se osigurati samo u slučaju kada se modeli režu iz kvalitetnih blokova ili ploča prethodno pripremljenih za izradu modela u tehnologiji lijevanja u pune kalupe.

Nakon pripreme modela u grubom obliku rezanjem, obično alatima ili vrućom žicom, daljnja se obrada vrši posebnim reznim alatima, primjerice rotacijskim alatima za finu obradu utora (broj okretaja 22 000 o/min.) na rotacijskoj ploči (sl. 2.9) [8].



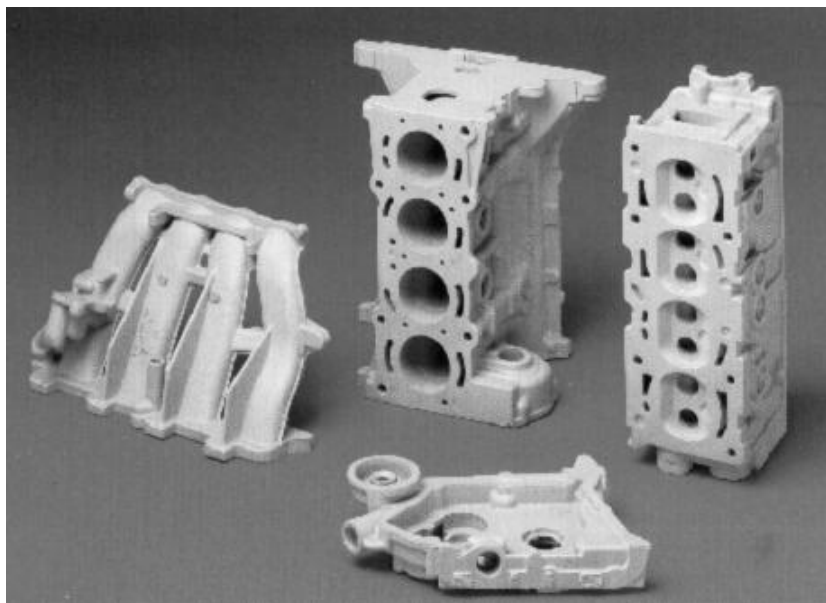
Slika 2.9 Proizvodnja modela od pjenastog polistirena [8]

Pjenasti polistiren lakše se i brže reže te obrađuje od drveta. Izrada modela od pjenastog polistirena za čelični odljevak prikazana je na (sl. 2.10) [8].



Slika 2.10 Izrada modela od pjenastog polistirena za čelični odljevak [8]

Gotovi modeli nakon obrade spremni su za umetanje u kalup. Slijedi prikaz nekih modela (sl. 2.11 ... sl. 2.12) [9].

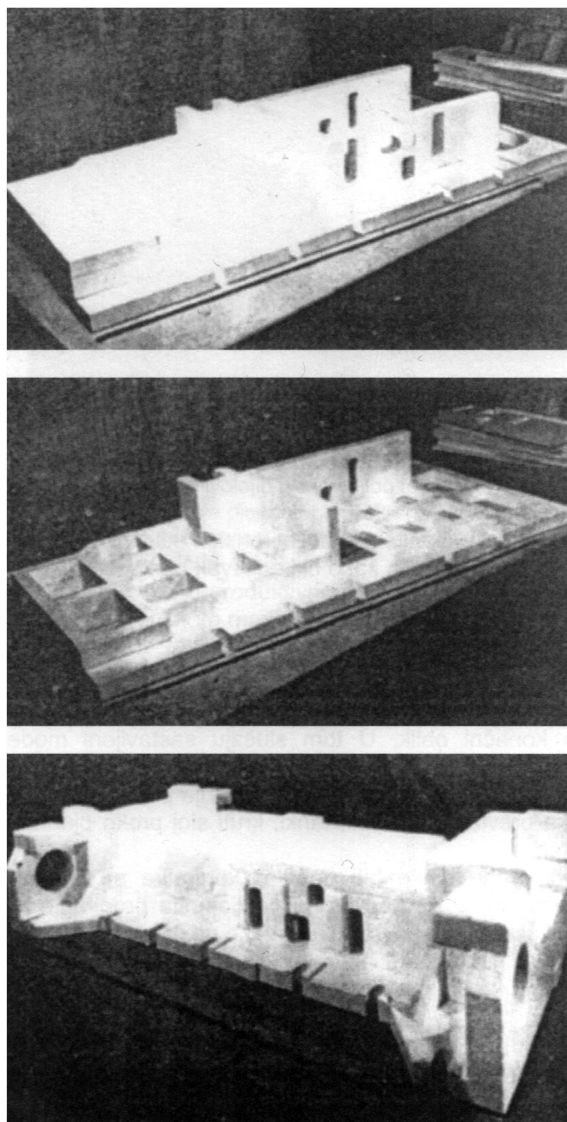


Slika 2.11 Pjenasti polistirenski modeli [9]



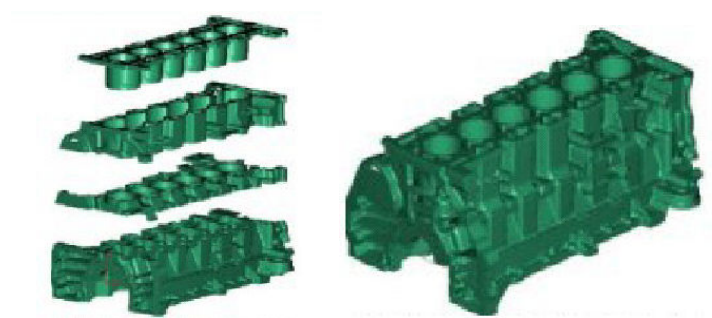
Slika 2.12 Pjenasti polistirenski modeli [9]

Zbog karakterističnih svojstava lijevanja u pune kalupe tj. zato što model ne mora biti uklonjen iz kalupa, pri izradi modela ne treba uzeti u obzir nikakve razdjelne plohe, udubine i slično. Da bi se osigurala najekonomičnija proizvodnja, a istodobno i bolja površina, mora se voditi računa o zahtjevima koje postavlja strojna obrada. Različite proizvodne faze pri izradi izgubljenog modela od pjenastog polistirena za alat za prešanje prikazuje (sl. 2.13).



Slika 2.13 Model za teški alat preše prikazan u različitim proizvodnim fazama [3]

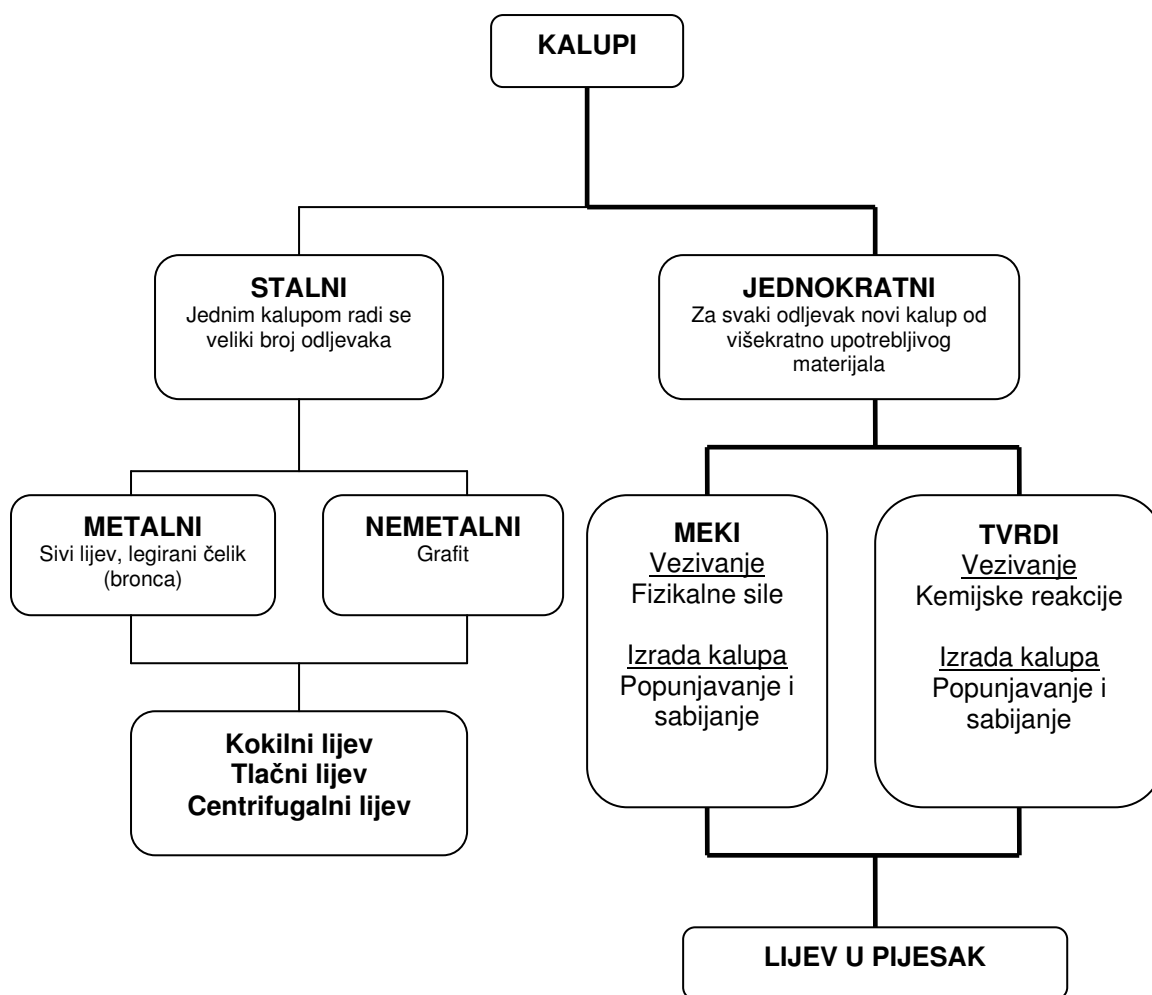
Modeli od pjenastog polistirena mogu se izrađivati i iz dijelova kako je prikazano na (sl. 2.14). [7]



Slika 2.14 Dijelovi polistirenskog bloka motora
dijelovi (lijevo), slijepljeni dijelovi (desno) [7]

3. JEDNOKRATNI I STALNI KALUPI

Kako bismo dobili konačan proizvod lijevanja, odljevak, moramo litinu uliti u kalup. Kalup je zapremnina kojom oblikujemo proizvod. Kalup je u stvari alat. S obzirom da se radi o tekućini, litina će poprimiti oblik zapremnine u kojoj se nalazi te nakon skrućivanja i hlađenja formirati željeni proizvod. Pomoću kalupa ne oblikujemo samo vanjski izgled odljevka već korištenjem umetaka (jezgri) formiramo unutarnje šupljine i kanale u odljevku.



Slika 3.1 Shematski prikaz upotrebe različitih vrsta kalupa [3]

Potrebno je definirati razliku između stalnih i jednokratnih kalupa. Jednokratni kalupi koriste se za male serije te je potrebno za svaki odljevak napraviti novi kalup. Kako samo ime kaže, jednokratni kalupi su za jednokratnu uporabu. Kod lijevanja u stalne kalupe pomoću jednog kalupa moguće je oblikovati veliki broj odljevaka.

Jedan kalup, ovisno o veličini odljevka, može sadržavati više odljevaka. Kalupi se u pravilu izrađuju od dva dijela tj. dvodijelni su. Kod stalnih razlog je da bi smo mogli izvaditi odljevak nakon ulijevanja, dok je kod jednokratnih razlog vađenje modela prilikom kalupljenja.

Kod horizontalno dijeljenih kalupa, obično se donji dio naziva donjak a gornji gornjak. Postoje i vertikalno dijeljeni kalupi, također dvodijelni, te se jedan dio naziva tlačni, a drugi protutlačni dio kalupa.

Prilikom odabira kalupa (*stalni ili jednokratni*), treba voditi računa o tehnološkim ali i ekonomskim kriterijima. Konkretno, valja paziti na odabir legure tj. vrstu i veličinu serije jer kalup mora biti izrađen od materijala temperaturno otpornijeg od legure koju u njega ulijevamo. U ovom dijelu detaljnije će biti opisani jednokratni kalupi jer su u *tehnologiji lijevanja u pune kalupe* i *model i kalup jednokratni*.

Odljevci od legura višeg tališta kao što su sivi, žilavi, čelični i legirani lijev, lijevaju se u jednokratne kalupe. Tako je sa većinom odljevaka. Materijal od kojega se sastoji jednokratni kalup naziva se *kalupna mješavina*. Kalupna mješavina se, uz određene tehnološke zahtjeve, ne odbacuje nakon lijevanja već ponovo koristi za iduće odljevke. Kalupna mješavina sastoji se od osnovnog materijala (kremenog ili kvarcnog pijeska), veziva i različitih dodataka.

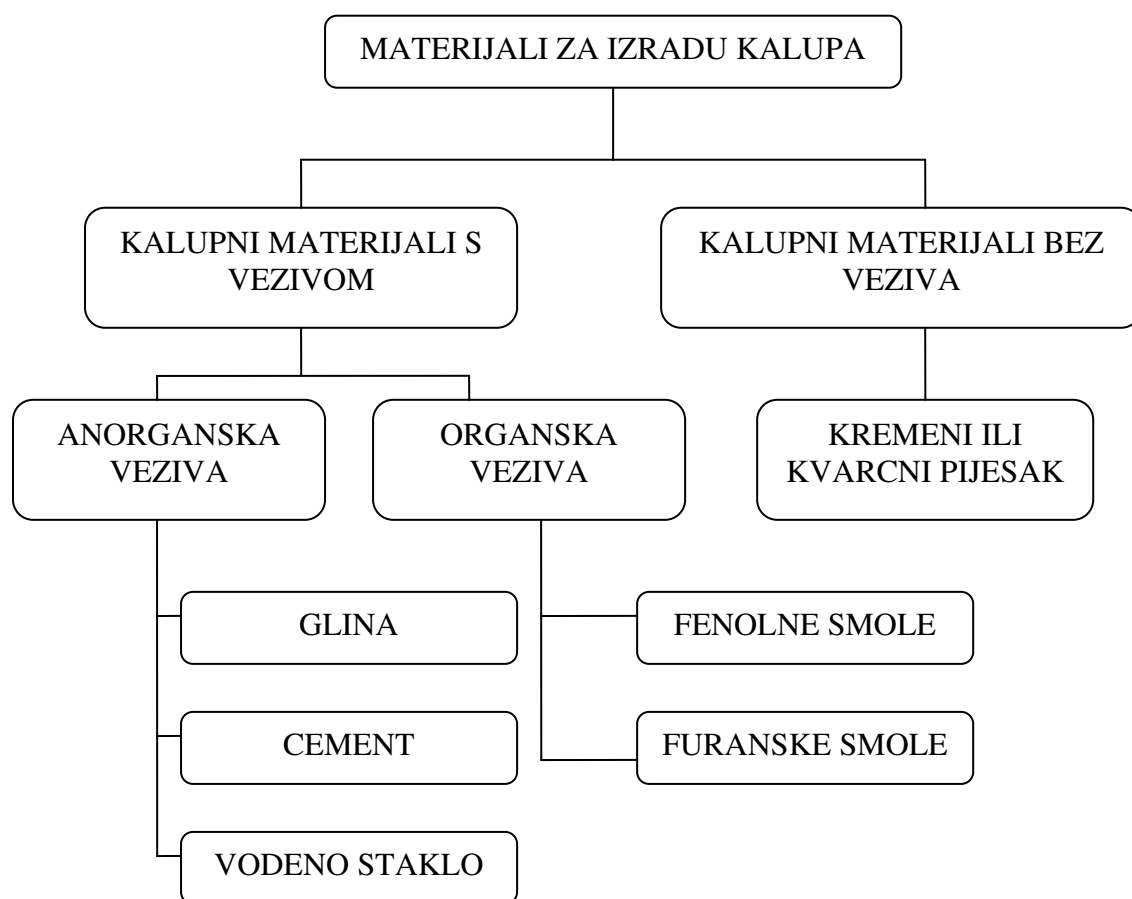
Prilikom lijevanja u jednokratne kalupe potrebno je prije ulijevanja izraditi kalupe. S obzirom da se radi o velikom broju kalupa to se radi na posebnim *kalupnim linijama*. Izrada jednokratnih kalupa naziva se *kalupljenje*. Vrstu jednokratnog kalupa obično određuje vezivo. Ukoliko se koristi vezivo koje vezuje fizikalnim silama (npr. bentonit), kalupe nazivamo mekima. Ako se vezivanje odvija kemijskom reakcijom (npr. furansko vezivo), takve kalupe nazivamo tvrdima. Meki kalupi imaju slabija mehanička svojstva od tvrdih kalupa. Meki kalupi su izvana ojačani metalnim okvirom kojega nazivamo *kalupnik*.

Da bi smo dobili odljevak, kakav smo zamislili i nacrtali potrebno je izraditi *model*. Modeli su u većini slučajeva višestruko upotrebljivi (obično su izrađeni od drva) no kod posebnih vrsta ljevova postoje i drugačija rješenja. Kod točnog lijeva i lijeva u pune kalupe koriste se jednokratno upotrebljivi modeli od voska ili polistirena. U tome slučaju za svaki kalup potrebno je izraditi i pripadajući model.

3.1 Materijali za izradu jednokratnih kalupa

U ovom dijelu obrađeni su materijali za izradu *jednokratnih* kalupa jer se oni koriste u tehnologiji lijevanja u pune kalupe. Jednokratni kalupi izrađuju se u ljevaonici u odjelu kaluparnice (često puta je izrada kalupa na kalupnoj liniji), od kalupne mješavine koja se sastoji od *osnovnog* materijala, *veziva* i *dodataka*.

Podjela materijala za izradu jednokratnih kalupa kod lijevanja u pune kalupe prikazana je na (sl. 3.2) [3].



Slika 3.2 Podjela materijala za izradu jednokratnih kalupa kod lijevanja u pune kalupe [3]

Slika pokazuje da se materijali za izradu kalupa dijele na dvije osnovne skupine i to:

- kalupnu mješavinu, koja se sastoji od:
 - pijesaka (najčešće kremeniti ili kvarcni pijesak)
 - veziva
 - dodataka

- kalupni materijal bez veziva, koji se sastoji od:
 - pijesaka (najčešće kremeniti ili kvarcni pijesak)

3.2 Kalupni materijali bez veziva

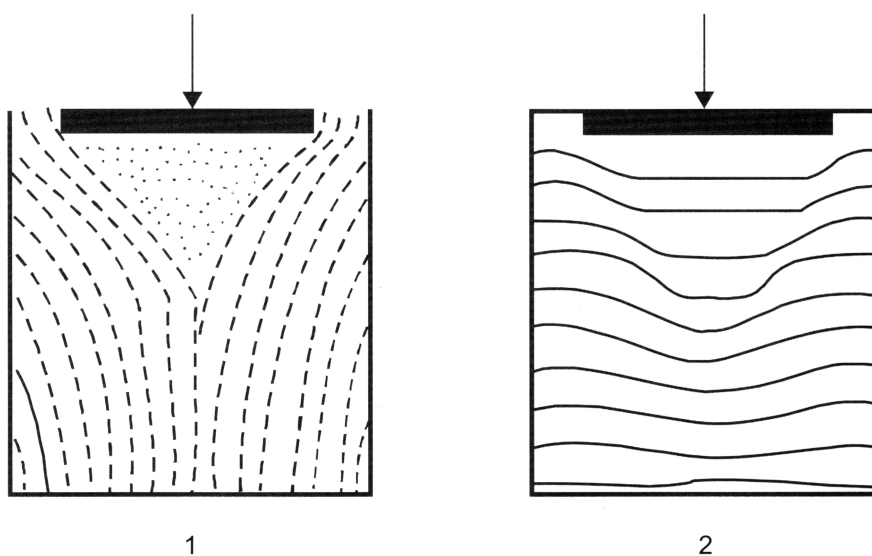
Čisti i suhi pijesak (najčešće kremeniti ili kvarcni), može se koristiti u tehnologiji lijevanja u pune kalupe. Dugo godina se među ljevačkim stručnjacima vodila rasprava da li je potrebno upotrebljavati kalupnu mješavinu pri lijevanju u pune kalupe ili je moguće za kalupljenje upotrijebiti čisti i suhi pijesak. Veći pomak u istraživanju svojstava pijeska pri lijevanju u pune kalupe napravili su građevinari, a ne ljevači.

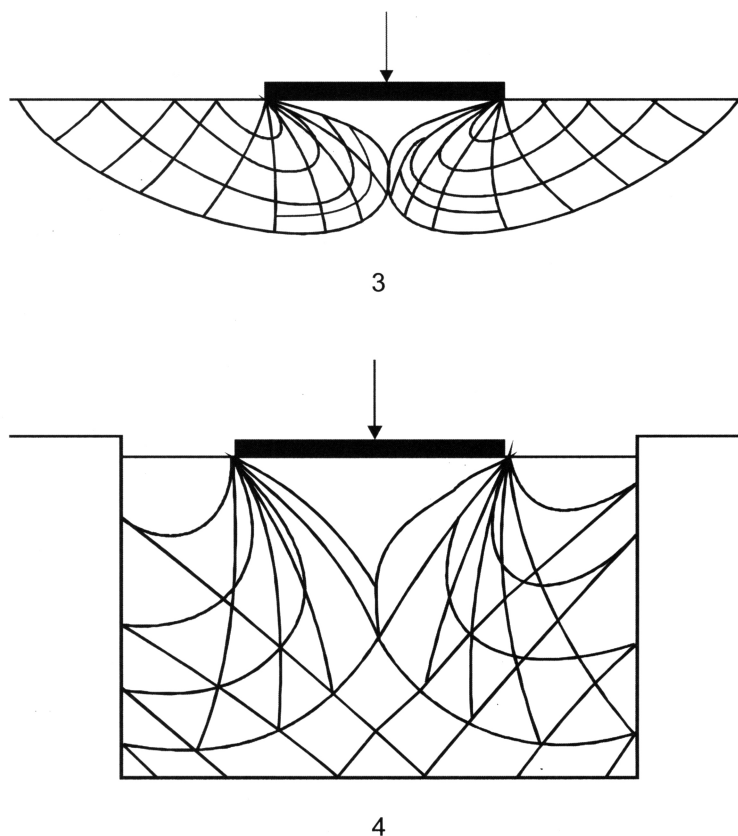
Iz mehanike tla i geologije poznato je da je glavni mineralni sastojak kremenog pijeska kvar ili kremen (SiO_2) nastao polaganim hlađenjem tekuće (kapljevite) magme u zemljinoj kori. Ako se omogući neometano hlađenje, kremen stvara bistro prozirne kristale u heksagonskom sustavu. Njegova tvrdoća po Mohsovoj ljestvici za minerale iznosi 7, tako da on para staklo. Gustoća mu je $2,6 \text{ g/cm}^3$, a nasipna masa kremenog pijeska iznosi $1,44$ do $1,60 \text{ g/cm}^3$. Pijesak je materijal bez kohezije i nema nikakav otpor prema smicanju na površini. Na određenoj dubini ispod površine, gdje je izložen dovoljnom tlaku odozgo, otpor gibanju zrna bez trenja je velik. Omeđena hrpa pijeska izdržat će zato teška opterećenja usporediva s onima koja izdrži kompaktna stijena. Propusnost pijeska gotovo u potpunosti ovisi o veličini zrna. Što je manja veličina zrna, sitnije su pore između njih i manja je propusnost. Sabijanje čistog pijeska pod utjecajem statičkog opterećenja praktički je neznatno u usporedbi s onim koje uzrokuju vibracije.

Važnost vibracija moguće je pokazati punjenjem cilindra čistim i suhim pijeskom. Ako se pijesak u cilindru tlači, vrlo će se malo deformirati. Protresemo li pijesak u cilindru, odnosno izložimo li ga vibracijama, dokazano je da će mu se volumen znatno smanjiti. Kod čistog pijeska to je i do 20 % smanjenja volumena te to smanjenje ovisi prvenstveno o granulaciji pijeska.

Inženjeri građevine su proučavali probleme temeljenja konstrukcija u pijesku bez veziva, pri čemu su u tolikoj mjeri razradili matematičke relacije da one mogu biti korisne pri analizi sila unutar kalupa od pijeska bez veziva.

Dijagrami prikazani na (sl. 3.3) [3] koriste se pri projektiranju temelja. Ta su načela primjenjiva i u slučaju opterećivanja kalupa od pijeska bez veziva.



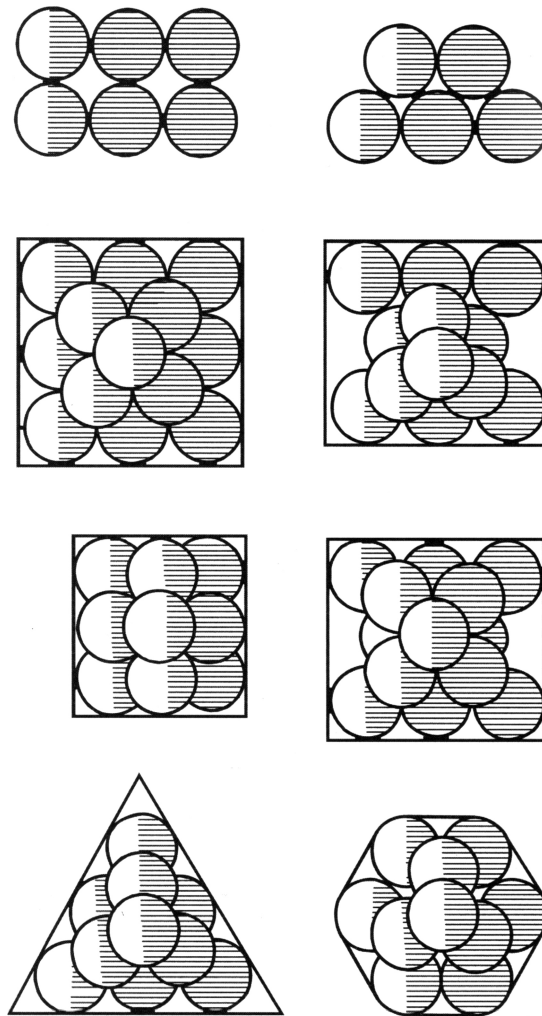


Dijagrami naprezanje - deformacija

Slika 3.3 Dijagrami mehanika tla za pijesak bez kohezije [3]

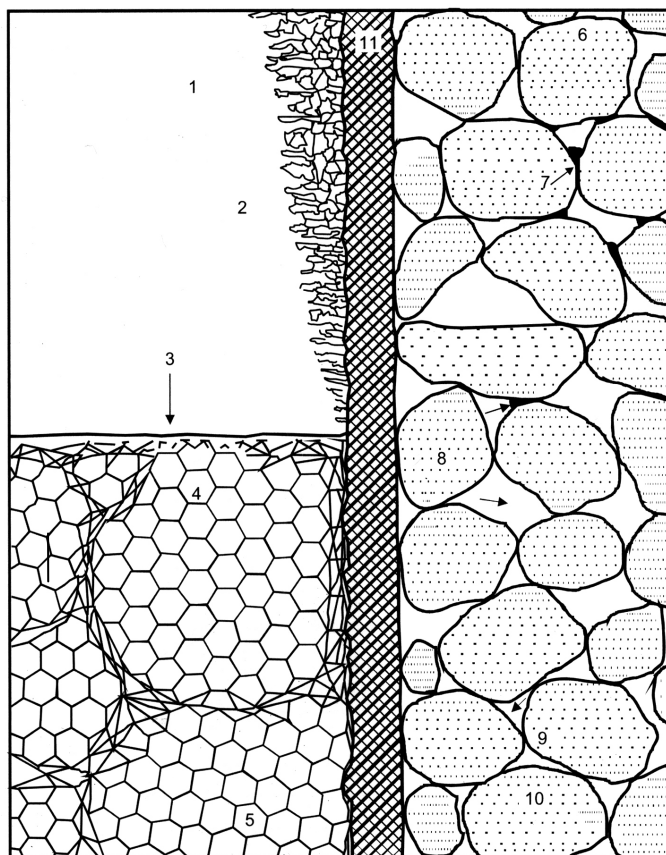
- 1 – gibanje zrna pijeska snimljeno kamerom
- 2 – gibanje obojenih slojeva
- 3 – neomeđeno gibanje
- 4 – omeđeno gibanje

Pri proučavanju pijeska često se ukazuje na tradicionalnu analogiju s otvoreno parkiranim i gusto parkiranim strukturama od kuglastih zrna (sl. 3.4) [3]. Ta istraživanja pokazala su i neke čudne empirijske podatke osim što su omogućila izračunavane konstrukcijskih odnosa pod određenim uvjetima. Zrna koja se sipaju u kutiju čine nepravilne komplicirane strukture, umjesto da se uredno slažu kao topovske kugle. Kuglasta zrna nasuta posve slučajno u veliki cilindar poprimaju «kut mirovanja» od oko 25 stupnjeva. Takove nakupine pijeska reagiraju kompleksnim gibanjima, s obzirom na narinute sile. Kuglasta zrna smještena u gumenu vreću iz koje se evakuira zrak, poprimaju konfiguracije koje su najbliže gusto parkiranim [3]. Takav pijesak postaje izrazito čvrst tj. tvrd.



Slika 3.4 Strukturne konfiguracije kuglastih zrna [3]

Struktura pijeska različita je od strukture tradicionalnih kuglastih zrna, jer zrna pijeska imaju tendenciju oblikovanja lokalnih mostova ili lukova (sl. 3.5) [3].



Slika 3.5 Uvećani dijagram koji pokazuje vatrostalnu prevlaku [3]

- 1 – ohlađena metalna stjenka, 2 – hlađenje metalnih kristala,
- 3 – struja litine, 4 – polistiren koji se rasplinjuje,
- 5 – ekspanzirani polistiren, 6 – zrno pijeska, 7 – kondenzirani stiren,
- 8 – rasplinuti stiren, 9 – odušci, 10 – zrna pijeska bez veziva,
- 11 – premaz

3.2.1.1. Svojstva kalupnih materijala bez veziva

Kalupni materijali bez veziva najčešće su različite vrste pijeska. To ovisi o materijalu koji se lijeva. Pijesak mora imati određena svojstva koja su opisana u nastavku.

Veličina zrna

Standardna analiza prosijavanjem zasniva se na uzorku isparenog i osušenog pijeska. Veličina zrna ne utječe na kvalitetu površine odljevka ako se na model nanese vatrostalni premaz (premazivanjem ili prskanjem). Osnovna zadaća premaza je osiguravanje kvalitete površine odljevka. Sitna zrna pijeska i prašine su nepoželjna jer ograničavaju propusnost pijeska.

Optimalna veličina zrnca ovisi o veličini odljevka i određuje se pokusom. Zbog lakšeg vođenja čitavoga procesa, poželjno je da zrna budu što ravnomjernije veličine. To se postiže prosijavanje pijeska.

Propusnost

Ovo svojstvo je najvažnija karakteristika pijeska. Ako je kalup nepropustan može djelovati kao brana plinovima nastalim rasplinjavanjem modela. U tome slučaju dolazi do «otpuhivanja» litine u izdanke na odljevku. To znači da litina ne može ravnomjerno popuniti kalup. Najbolji odljevci dobivaju se korištenjem pijeska s najvišom propusnošću.

Izolacija

Pijesak bez veziva izvrstan je izolator. Ima toplinsku vodljivost nisku gotovo kao sirovi azbest. Odljevci lijevani u pijesak bez veziva hlade se mnogo sporije od odljevaka u kalupu s vlažnim vezivom.

Vatrostalnost

Silicijev dioksid (SiO_2) ima talište na 1649°C . Grijanjem na visoke temperature mijenja kristalnu rešetku. Za lijevanje pri višim temperaturama može se koristiti cirkonski pijesak.

Sabijanje

Pijesak bez veziva može se sabiti do mnogo većih gustoća nego bilo koji drugi pijesak za kalupljenje. Za određivanje postignute sabijenosti služi kao test jednostavno mjerenje smanjenja volumena nakon sabijanja.

Sadržaj vlage

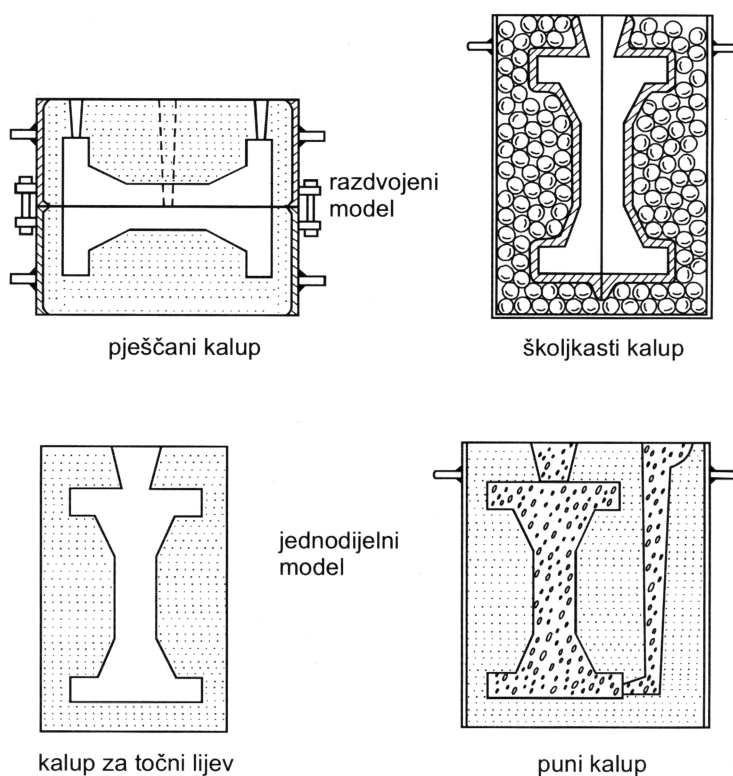
Jedina vlaga u pijesku je u biti kondenzacija iz atmosfere. Tako da su ispitivanja rijetko potrebna. Optimalna vlažnost jednaka je nuli, tj. radi se o suhome pijesku.

Temperatura

Pijesak kojem je temperatura iznad 77°C ošteti će modele, pa je nužna točna kontrola temperature. Temperatura pijeska ne bi smjela biti veća od 30°C .

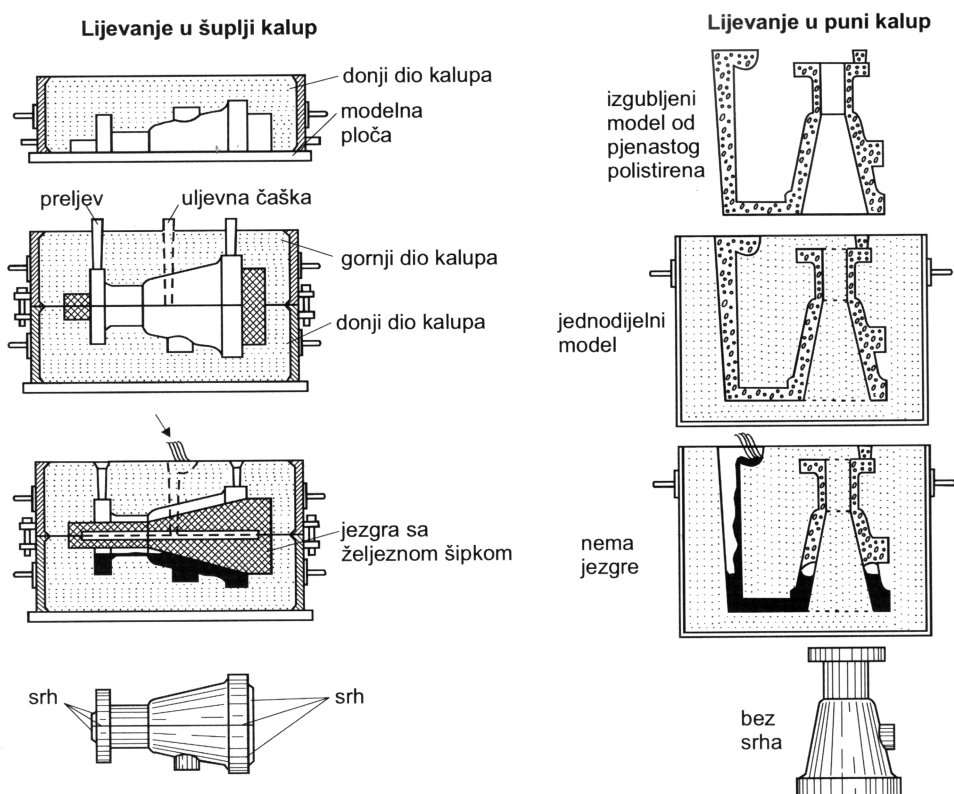
3.3 Kalupljenje

Opća karakteristika svih postupaka kalupljenja i lijevanja, bez obzira jesu li tradicionalno u upotrebi ili su razvijeni tijekom posljednjih desetljeća, je primjena šupljeg kalupa (sl. 3.6) [3]. Pri tome se kalupna šupljina dobiva na dobro poznat način oblikovanja kontura odljevaka u kalupnom materijalu pomoću trajnog modela koji se može izraditi od najrazličitijih materijala. Nakon toga model se odvaja od kalupnog materijala, a kalupna šupljina oblikuje se spajanjem pojedinih dijelova kalupa, eventualno nakon umetanja dodatnih jezgara. Tako se dobiva kalupna šupljina, koja po svemu odgovara obliku predviđenog proizvoda. Konačno se šupljina puni litinom. Nakon skrućivanja odljevak se vadi iz kalupa.



Slika 3.6 Kalupne naprave za različite postupke lijevanja [3]

Nasuprot toj tehnici, izgubljeni model od pjenastog polistirena, koji se koristi u procesu s punim kalupom uložen je u kalupnik koji je najčešće zatvoren s donje strane (sl. 3.6) [3]. Ako je nužno, model za uljevni sustav može također biti izrađen od pjenastog polistirena. Nakon zasipanja modela kalupnom mješavinom, kalup je pripremljen za lijevanje. Ulaskom litine u kalup pri lijevanju, model se postepeno rasplinjuje, a litina zauzima mjesto modela od pjenastog polistirena i skrućuje se (sl. 3.7) [3].



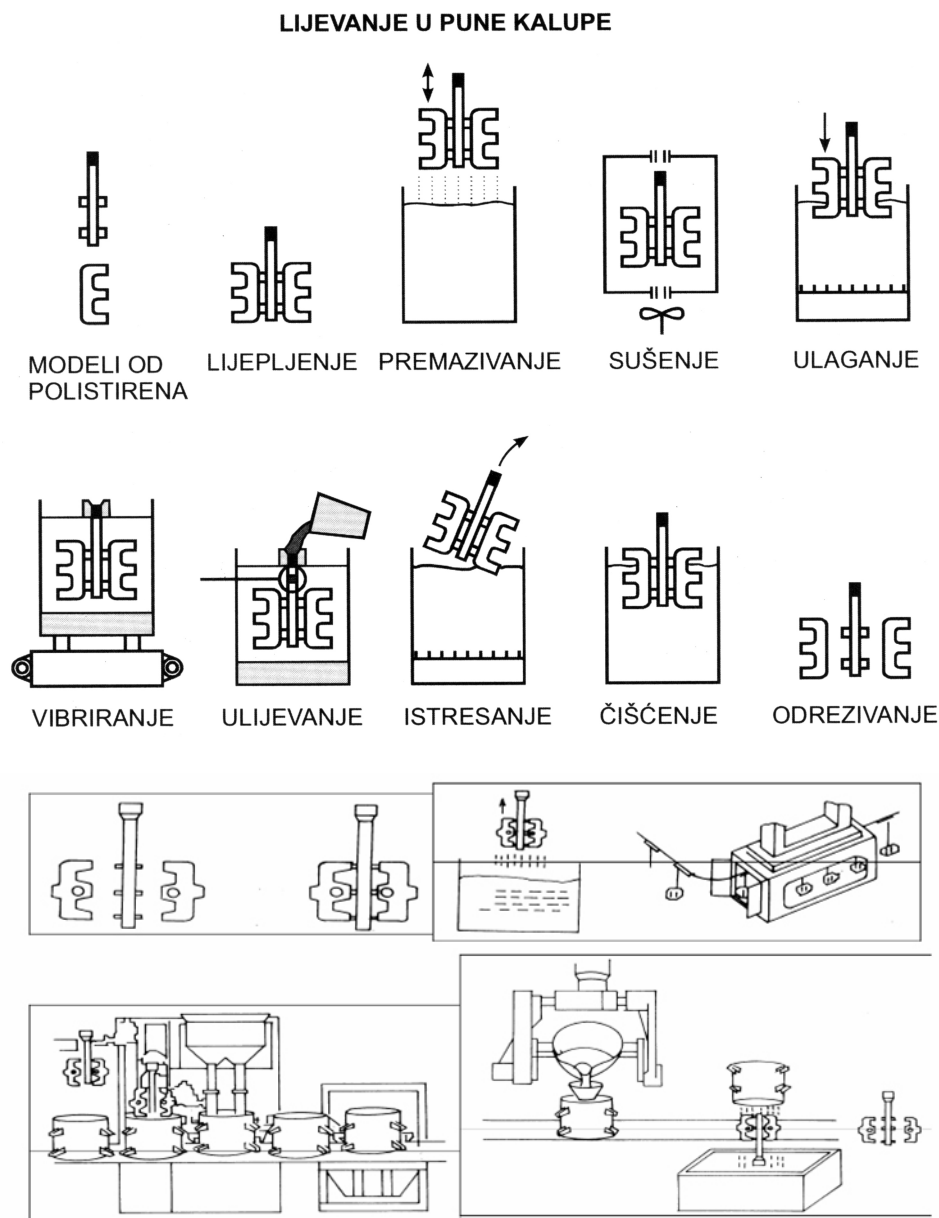
Slika 3.7 Postupak kalupljenja pri ulijevanju u šuplji kalup (lijevo) i pri lijevanju u puni kalup (desno) [3]

Postupak s punim kalupom zadovoljava današnje zahtjeve tehnologije kalupljenja i lijevanja. Proces pridonosi eventualnom rješavanju mnogih problema koji se javljaju u praksi, a dosad su izgledali nerješivi.

Za lijevanje u pune kalupe primjenjuju se polistirenski modeli koji se rasplinjuju. Korišteni kalup je jednodijelni, a proces se naziva postupkom «izgubljenog modela» jer se model izrađuje od pjenastog polistirena, pa litina ulazeći u kalup postepeno rasplinjuje model, zauzima njegovo mjesto te skrućuje.

Takav način rada ranije se koristio, prije svega, za umjetničke predmete no danas se svakodnevno upotrebljava u ljevačkoj proizvodnji.

Proizvodne faze pri lijevanju u pune kalupe prikazane su na (sl. 3.8). [3]



Slika 3.8 Proizvodne faze pri lijevanju u pune kalupe [3]

Široka upotreba postupaka koji koriste jednodijelne modele mogla bi biti presudna u tehničkom i ekonomskom razvoju procesa kalupljenja i lijevanja:

- pri proizvodnji velikih odljevaka pomoću višedijelnih kalupa ukupna tolerancija ovisi o neizbježnoj široj toleranciji okomito na diobenu ravninu kalupa, a primjenom jednodijelnih kalupa može se postići znatno suženje granica tolerancije
- svi dosadašnji napori da se mehanizira ili čak automatizira postupak čišćenja odljevaka uklanjanjem srha (koji se ne može izbjeći pri lijevanju u višedijelne kalupe) bili su neuspješni. Potpuno izbjegavanje srha moguće je jedino upotrebom lijevanja u jednodijelne kalupe.

3.3.1.1. Ulijevanje litine

Prilikom lijevanja u pune kalupe modeli se povezuju u uljevni sustav u grozdovima. Pritom treba paziti na to da nastala cjelina bude što otpornija prema izobličenju s obzirom na razlike u gustoći između pjenastog materijala, kalupnog materijala i litine koja se ulijeva u kalup.

U praksi se lijevanje u kalup vrši odozdo i odozgo. Osobito treba paziti na to da se osigura kontinuirano, što ravnomjernije napredovanje litine (preporučuju se brzine od 0,01 do maksimalno 0,05 m/s za lijevano željezo). Svaki prekid protjecanja mogao bi izazvati pristup zraka i smetnje u procesu rasplinjavanja modela. Treba izbjeći izrazitu turbulenciju litine jer odliveni jezičci odnosno otoci pjenastih materijala potiču izlučivanje grafita.

Ako se za oblaganje modela koristi kalupni materijal bez veziva (obično kameni pijesak), manje treba brinuti o vatrostalnosti, a više o propusnosti za plinove. Temperatura kalupnog pijeska ne bi smjela biti iznad 50 °C niti ispod 10 °C, da se osigura kontinuitet uvjeta proizvodnje odljevaka.

Za oblaganje modelnih grozdova u kalupni materijal prikladan je postupak tzv. tekućeg pijeska. Raširena je metoda rada nasipavanjem modela kalupnim pijeskom pomoću savitljivih cijevi. Za vrijeme nasipavanja započinje vibriranje u cilju zgušnjavanja pijeska. Mnogi korisnici biraju za nasipavanje okrugle kalupnike zbog njihove otpornosti na vibriranje i prikladnosti za tijek kalupnog pijeska.

Vibriranje kalupnog pijeska mora osigurati potpuno, ali nježno oblaganje mješavinom ravnomjerne gustoće i odgovarajuće popunjavanje svih modela i šupljina. Vibracijski stol je većinom opremljen s nekoliko vibratora (tri ili više), usmjerenih u različitim pravcima uz frekvencije od 50 do 100 Hz. Za jednostavnije i manje zahtjevne odljevke, sustav vibriranja je jedinstven dok se za složenije odljevke rade programi za upravljanje vibriranjem ovisno o veličini, složenosti i materijalu modela te ovisnosti o vrsti i sastavu pijeska za izradu kalupa. U tu su svrhu u Italiji razrađeni postupci ispitivanja za određivanje procesa koji se odvija u pijesku tijekom vibriranja.

Na uljevni sustav montira se u većini slučajeva metalni lijevak da bi se olakšalo kontinuirano ulijevanje. Dio toplinske energije litine troši se na isplinjavanje modela od pjenastog polistirena te se mora upotrijebiti litina veće temperature nego pri lijevanju u pješčane kalupe s kalupnom šupljinom. Za odvođenje povećane količine plinova koji se javljaju pri isplinjavanju modela moguće je primijeniti tehniku potlaka kalupa što povoljno djeluje na brzinu odvođenja plinova i smanjenje količine izlučenog ugljika, ali dodatno komplicira i poskupljuje proizvodnju. Problem povećane količine plinova jednostavnije je riješiti ugradnjom odzračnika u kalupnik i odzračnih cijevi u kalupni pijesak.

Što se tiče utjecaja na okoliš pri lijevanju u pune kalupe potrebna je kontrola koncentracije pentana izlučenog iz materijala modela. Za temperaturu lijevanja litine od lijevanog željeza računa se praktički na potpun raspad polistirenskog modela. Kod aluminijskih legura, gdje je temperatura ulijevanja niža, mjerenjem je utvrđeno da je količina izlučenog pentana znatno ispod dozvoljene razine.

Konstrukcija cijelog uljevnog sustava, a posebice čaške veoma je bitna pri lijevanju u pune kalupe. Zato je bitno provesti prethodno probno lijevanje i tako ispitati adekvatnost konstrukcije uljevnog sustava. Za male šarže odljevaka, za koji se koriste skupi modeli, najbolji je postupak upotreba uljevnog sustava od keramike, da bi se izbjegli problemi sa uključinama zraka.

Problemi turbulencije, vrtloženja i uključina zraka na vrhu čaške dugo su bili predmetom istraživanja uz konvencionalne metode lijevanja, koja su dovela do toga da se preporučuju pravokutne, prema dolje sužene čaške. Premda je čaška kritična, može se uspješno primijeniti skoro za svaku vrstu lijeva. Svi oblici uljevnog sustava koji su se pokazali kvalitetni pri konvencionalnom lijevanju mogu se uspješno primijeniti i pri lijevanju u pune kalupe s pijeskom bez veziva.

Pri ulijevanju stanice ekspaniranog polistirena počinju pucati na 77°C , pri čemu im se volumen postupno smanjuje otprilike 40 puta. Nastala rastaljena masa počinje isparivati pri 204°C , a uz prisutnost kisika doći će i do zapaljenja plinova. Ako se plinovi zapale, reakcija je egzotermna. Ako ne dođe do zapaljenja proces je endoterman, pri čemu toplinska energija dolazi iz litine. Brzina raspada i isparavanja je funkcija temperature litine i ukupne raspoložive topline bilo iz litine ili od izgaranja polistirena.

Odljevci od mekih, lakotaljivih metala pokazuju da i uz nisku temperaturu (205°C) litina može rasplinuti polistirenski model. Mogu se lijevati odljevci od olova, olovnih legura, cinka te drugih metala u području taljenja između 260°C i 482°C . Olovne odljevke je teško odliti uz niske uljevne temperature zbog čestih prekida protoka hladnim začepljenjem, pa takve metale treba pregrijati da bi se neometeno proizvodili odljevci. Također je primijećeno da se polistirenski model raspada tako sporo da se litina često ohladi prije nego što pjena potpuno ispari. Zato se u praksi ne primjenjuju polistirenske pjene s gustoćom iznad 32 kg/m^3 . Kasnije će biti opisan utjecaj gustoće polistirenskih modela različitih gustoća s obzirom na livljivost metala.

Pri lijevanju aluminija preporuča se ulijevanje uz što nižu temperaturu, a pri kojima se još uvijek dobiva kvalitetan odljevak. Pregrijavanje može prouzročiti povećanje plinske poroznosti. Zato nije uputno pregrijavati metal, nego se bolje poslužiti polistirenskim modelima nižih gustoća koje lakše isparavaju.

Mjedi i bronce mogu se lijevati s konstantno dobrim rezultatima uz normalne uljevne temperature od 927°C do 1149°C . Uz ove temperature isparavanje modela postaje djelomično egzotermno jer obično ima nešto više kisika u kalupima.

Željezni se odljevci ulijevaju s višom temperaturom i vrlo brzo jer je takav način ulijevanja provjeren u praksi. I u ovom slučaju mora se uzeti u obzir gustoća polistirena jer ona može biti mjerodavna za moguće brzine ulijevanja. Katkada je možda poželjno primijeniti pjenasti polistirenski model više gustoće zbog smanjenja tražene brzine ulijevanja. Pri lijevanju željeznih materijala nije neophodna nikakva dodatna toplina radi isparavanja pjenastog polistirenskog modela, jer visoke uljevne temperature mnogo bolje rasplinjavaju ostatke koji sadrže ugljik, a potječu od raspada pjenastog polistirenskog modela.

Kritičnija od temperature ulijevanja je tehnika ulijevanja. Ulijevanje metala brzinom koja će biti jednaka brzini rasplinjavanja polistirenskog modela bitna je za dobivanje kvalitetnog odljevka pri lijevanju u pješčani kalup bez veziva.

Polagano ili isprekidano ulijevanje uzrokovat će znatna oštećenja kalupa. Međutim, primjena čvrste prevlake na modeli može riješiti taj problem. Na model se može nanijeti prevlaka da bi poduprla pijesak, djelomično čak i nakon rasplinjavanja polistirenskog modela. Za male odljevke bitno je brzo ulijevanje koje se postiže primjenom uljevnih čaški s čepovima.

Sve metali moraju se ulijevati pri temperaturama dovoljnim za rasplinjavanje polistirenskog modela i uz brzine ulijevanja dovoljno velike da onemoguće oštećenja kalupa i greške na odljevcima.

Metalurzi si ispitivanjem također došli do zaključka da odljevci od sivog lijeva lijevani u puni kalup u kalupnu mješavinu s furanskim vezivom, imaju bolju obradivost odvajanjem čestica od odljevaka lijevanih u konvencionalne jednokratne kalupe. U odljevcima nije bilo uključina troske uz odgovarajuće uvjete lijevanja.

Dva su uzorka analizirana da bi se odredile razlike između kemijskog sastava lijevanog željeza odljevenog u konvencionalnom kalupu i lijevanog željeza odljevenog u punom kalupu (lijevano je iz iste šarže – iste peći).

Rezultati ispitivanja prikazani su u (tabl. 3.1) [3].

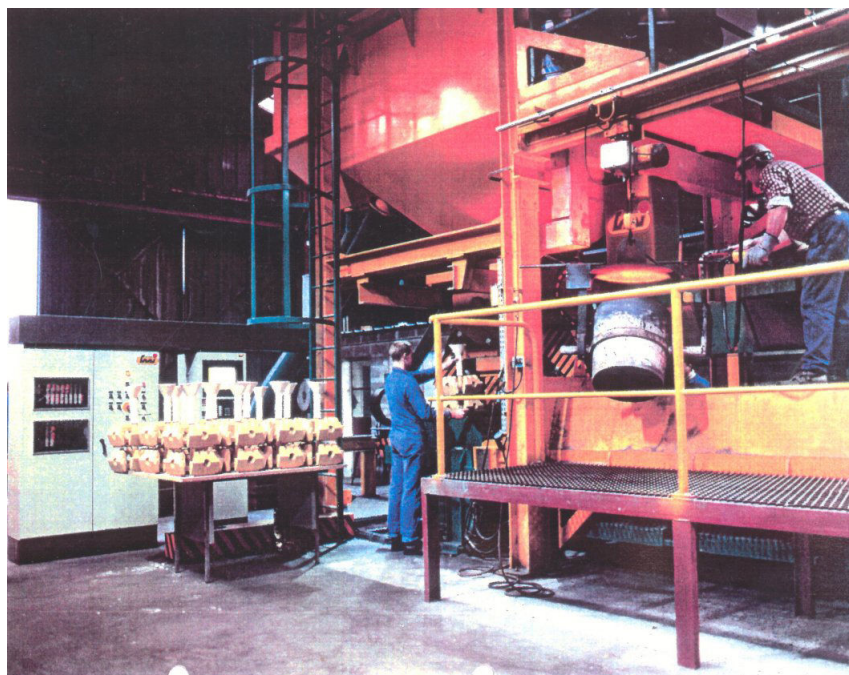
Tablica 3.1 Rezultati ispitivanja kemijskog sastava kod lijevanja u konvencionalni kalup i lijevanja u puni kalup [3]

%	Puni kalup	Konvencionalni kalup
C	3,02 %	3,02 %
Mn	0,97 %	0,90 %
S	0,08 %	0,08 %
P	0,08 %	0,09 %
Si	2,03 %	2,02 %
Ca	tragovi	tragovi
Cr	0,27 %	0,26 %
Mo	0,04 %	0,04 %
Ni	0,37 %	0,37 %
Ti	0,02 %	0,02 %
Cu	0,09 %	0,11 %
Zn	-	-
Al	0,003 %	0,005 %
Kisik	0,090 %	0,130 %
Vodik	0,0006 %	0,0006 %
Dušik	0,010 %	0,010 %

Jedina značajna razlika između kemijskog sastava kod konvencionalnog načina lijevanja i lijevanja u pune kalupe je u količini kisika u lijevanom željezu. U željezu lijevanom u puni kalup smanjen je sadržaj kisika za 0,040 %. Može se pretpostaviti da bi se slični rezultati dobili analizom lijevanog željeza lijevanom u pješčanom kalupu bez veziva. [3]

Slijedi prikaz ulijevanja litine u pune kalupe na (sl. 3.9) [10] u pogonskim uvjetima.





Slika 3.9 Ulijevanje litine u pune kalupe [10]

3.3.2. Hlađenje, istresanje i čišćenje odljevaka

3.3.2.1. Hlađenje odljevaka

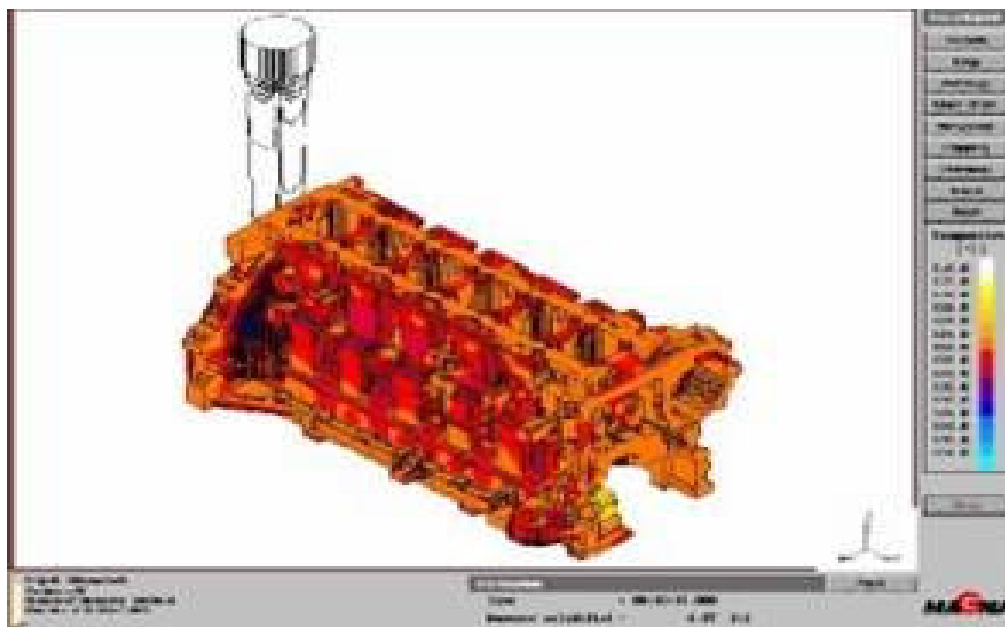
Odljevci koji se lijevaju u pijesku, poslije očvršćivanja ostaju neko vrijeme u kalupu jer se sporije hlade od odljevaka lijevanih u kalupnu mješavinu. Preranim vađenje odljevaka iz kalupa, on se izlaže djelovanju okolne atmosfere, što uzrokuje brzo hlađenje odljevka. Posljedica brzog hlađenja očituje se na odljevku kao greška u obliku izvitoperenja i pukotina. Potrebno vrijeme hlađenja odljevka koji se lijeva u pješčani kalup ovisi o masi odljevka (tabl. 3.2) [3], debljini njegove stijenke, vrsti legure koja se lijeva, kao i temperaturi litine.

Tablica 3.2 Vrijeme hlađenja u kalupu ovisno o masi odljevka [3]

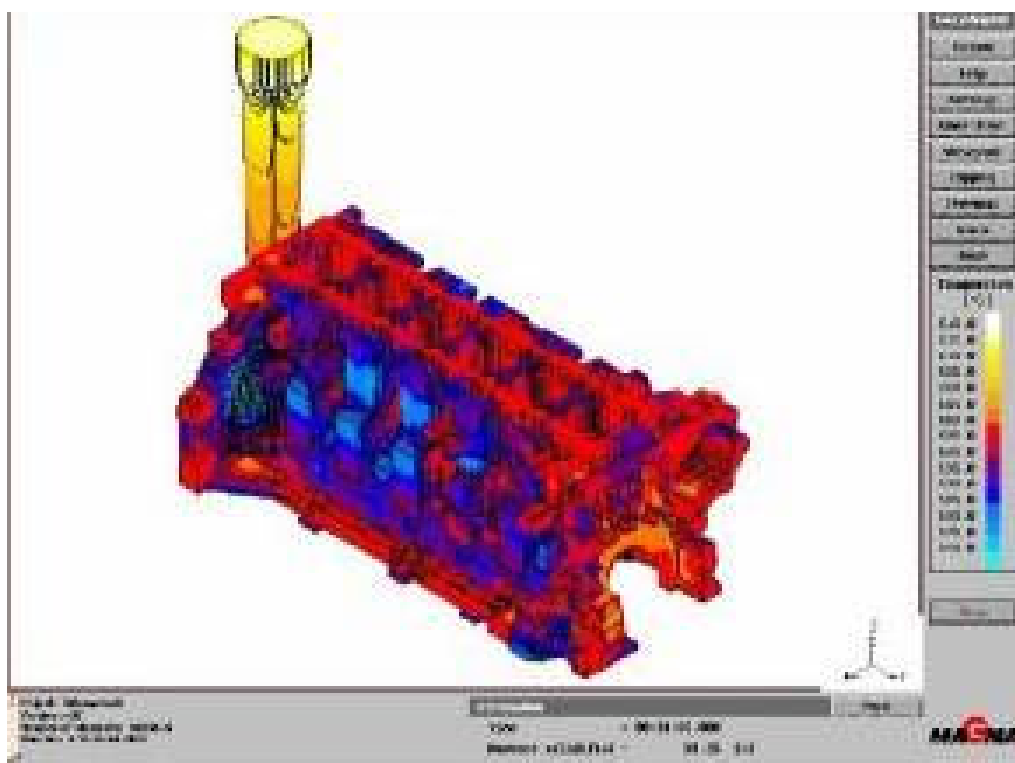
Masa odljevka [kg]	Vrijeme hlađenja [s]
10	540
10 ... 30	540 ... 1440
30 ... 50	900 ... 1800
50 ... 100	1080 ... 2160
100 ... 250	1800 ... 3600
250 ... 500	2880 ... 7200
500 ... 1000	5400 ... 10080

Danas se postupak skrućivanja prethodno može vrlo lako predvidjeti korištenjem raznih računalnih programa, koji nam tako ubrzavaju cijelu operaciju i umanjuju mogućnost grešaka na odljevku.

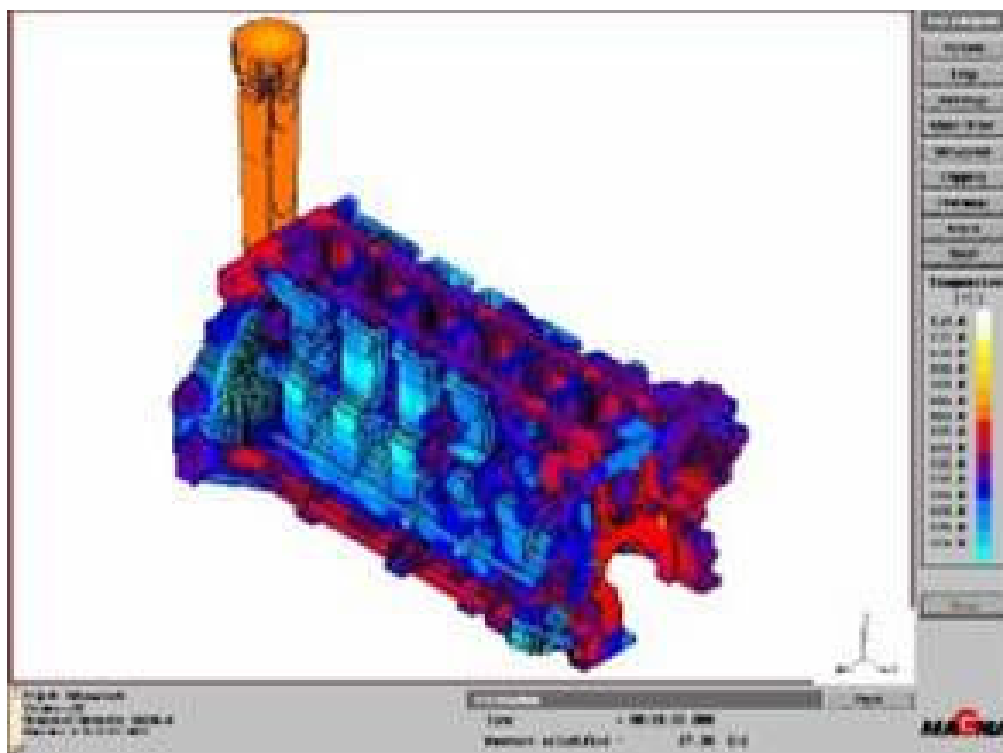
Na (sl. 3.10) [7] prikaz je simulacije skrućivanja bloka motora.



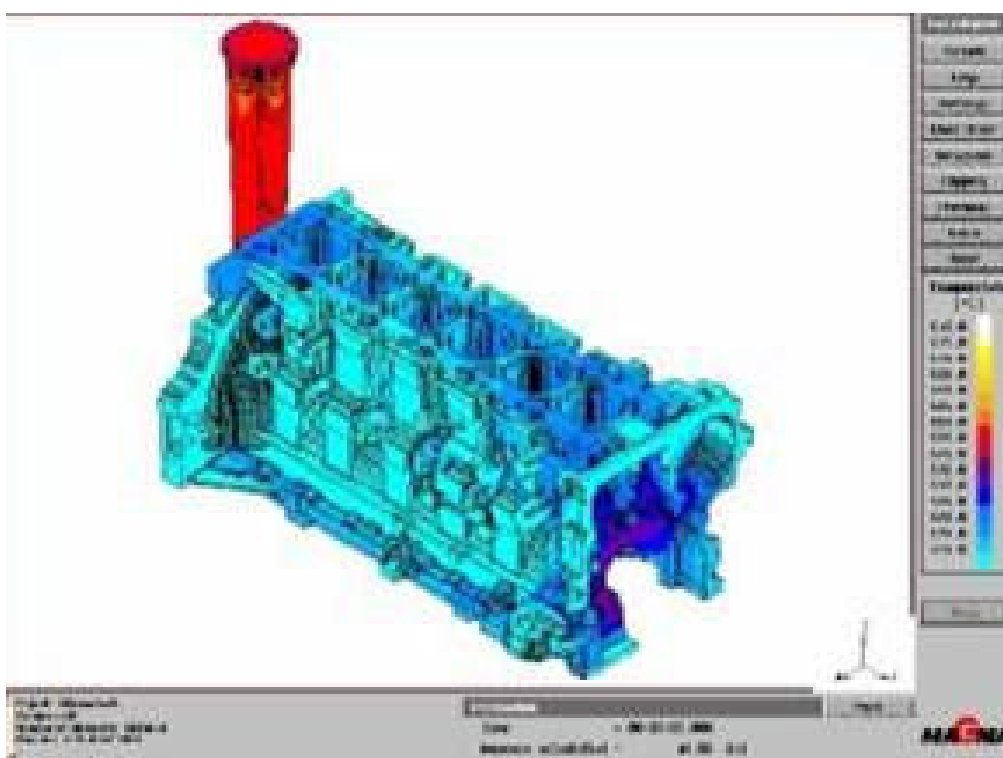
30 sekundi nakon ulijevanja litine



60 sekundi nakon ulijevanja litine



90 sekundi nakon ulijevanja litine

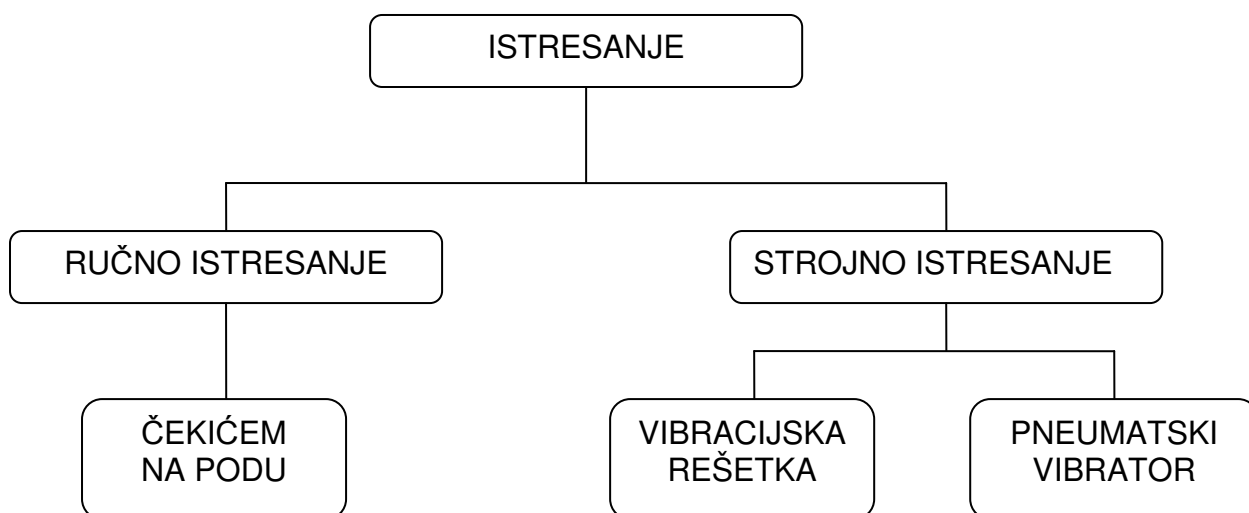


180 sekundi nakon ulijevanja litine

Slika 3.10 Simulacija skrućivanja bloka motora lijevanog u čisti pijesak [7]

3.3.2.2. Istresanje odljevaka

Nakon hlađenja u kalupu odljevak je spreman za vađenje. Vadi se istresanjem koje može biti strojno ili ručno (sl. 3.11) [3].



Slika 3.11 Shematski prikaz postupaka istresanja odljevka iz kalupa [3]

Ručno istresanje malih kalupa vrši se na mjestu gdje je lijevanje obavljeno. U mehaniziranim ljevaonicama, gdje se transport kalupa vrši pomoću koturnih staza ili konvejerom, istresanje se vrši na vibracijskoj rešetki. Rešetka je pričvršćena na opruge i dovodi se u fazu vibriranja pomoću neuravnoteženog rotora ili ekscentra. Broj udaraca kreće se od 1000 u minuti na više, zavisno o veličini i konstrukciji rešetke. Pod djelovanjem vibracija kalup se razruši, pijesak propada kroz rešetku na transportnu traku, a odljevak i kalupnik ostaju na rešetki. Kalupnik se vraća u kaluparnicu, a odljevci se transportiraju na čišćenje. Istresanje velikih kalupa vrši se pomoću pneumatskog vibratora.

3.3.2.3. Čišćenje odljevaka

Poslije istresanja iz kalupa, s odljevaka se odstranjuju priljevci (uljevni sustav, pojila, odušci i dr.) Kod krhkih ljevova kao što su sivi lijev, temper ili bijeli lijev oni se jednostavno odlome. Kod žilavih ljevova kao što su čelični lijev ili obojeni metali odstranjivanje se vrši odrezivanjem. Kod čelika se rezanje vrši pilom ili plinskim plamenikom, a kod obojenih metala pilom ili pomoću tanke brusne ploče. Odlamanje priljevaka vrši se prije čišćenja, a rezanje poslije čišćenja [3].

Mnoge ljevaonice riješile su problem uskog grla u proizvodnji u odjelima za čišćenje i završnu obradu tko što su modernizirale sustave vibracijskog čišćenja. Količina prenesenog pijeska kao i pijeska nalijepljenog na odljevkke je najveći pojedinačni čimbenik u troškovima sačmanja (rad, potrošnja sačme, potrošnja energije, zamjena istrošenih dijelova, vrijeme održavanja).

Sprečavanjem ulaska pijeska u odjele za čišćenje odljevaka te zadržavanjem pijeska u sustavima gdje mu je i mjesto, korist je višestruka. Također osim što se štedi na samome sačmanju, druge uštede uključuju manje trošenje na sakupljačima prašine, manji je tok otpada, nema čestica silicijevog oksida u zraku i skraćeno je vrijeme čišćenja.

Kada su odljevci prvo čišćeni u vibracijskom sustavu, usko grlo čišćenja i završne obrade je eliminirano. Kada se spare predčišćenje i hlađenje odljevaka, tok proizvodnje postaje izrazito tečan.



Slika 3.12 Bubnjasta čistilica tvrtke *Didion* [11]

Imajući očišćene elemente uljevnog sustava koji idu direktno u odjel za taljenje uvelike rasterećuje usko grlo odjela za čišćenje. Ako su elementi uljevnog sustava prevelik problem za sačmanje nakupljaju se velike količine troske, skraćuje se vijek trajanja peći te se snizuje efikasnost taljenja. Uštede samo u odjelu za taljenje mogu lako opravdati potrebu za čistim povratnim tokovima direktno iz odjela za vibracijsko čišćenje. Čišće taljenje, završna obrada i područja vibracijskog čišćenja zajedno pridonose boljem i sigurnijem radnom mjestu. Ljevaonice kao *Saint Gobain Pipelines*, *Sinclair Works* iz Telforda, Engleska, unaprijedili su svoje operacije vibracijskog čišćenja i završne obrade instaliravši *Didion* rotacijski bubanj kako bi eliminirali sačmanje u cijelosti.

Pijesak je odvojen od odljevaka i prosijan dva puta na gradaciju manju od 9 mm. Svi metalni dijelovi su temeljito očišćeni prizmatoidnom rotacijskom oplatom, koja u isto vrijeme štiti i hladi odljevke. Nakon izlaska iz bubnja, odljevci se kratkotrajno potapaju u vodi radi završnog ohlađivanja. Čisti odljevci automatskim konvejerima odvoje do brusilica u odjel za završnu obradu. Čisti dijelovi uljevnog sustava idu direktno nazad u odjel za taljenje.

Svjetski proizvođači odljevaka poput *Waupaca Foundries*, *Wescast*, *Intermet*, *Grede*, and *Victaulic* iz SAD-a, su modernizirali svoje sustave vibracijskog čišćenja sa *Mark 5* bubnjevima. Željezni odljevci sa teškim uljevnim sustavima koje radnici pokušavaju ukloniti ručno se automatski uklanjaju u *Didionu*. Uštede u radnoj snazi za ovaj težak i opasan posao su sami opravdali troškove modernizacije odjela za vibracijsko čišćenje.

Približno 20% troškova da se proizvede 10 kg odljevaka proističe iz metoda čišćenja. Kombinirajući vibracijsko čišćenje, prosijavanje, čišćenje i hlađenje odljevaka, ljevaonice željeza mogu lako smanjiti svoje troškove za 50 % i uštedjeti oko 80 \$/t.

Na (sl. 3.13) [11] prikazan je sustav bubnjaste čistilice i konvejera za transport očišćenih odljevaka.



Slika 3.13 Bubnjasta čistilica i konvejer s odljevcima [11]

Vibracijsko čišćenje i hlađenje nisu sastavni dijelovi odjela za čišćenje ali mogu biti izrazito važni samome odjelu zbog toga što vremena hlađenja odljevaka i metoda vibracijskog čišćenja mogu igrati veliku ulogu u ukupnim troškovima.

Hlađenje odljevaka može se postići na tri načina: u kalupu ili van njega ili kombinirano. Zbog metalurških razloga neki odljevci zahtijevaju duže vrijeme hlađenja u kalupu.

Ukoliko ne postoji zahtjev za hlađenjem odljevka u kalupu, u interesu je ljevaonice da ukloni odljevak iz kalupa što je brže moguće. Kako odljevak postaje hladniji, sve je teže odstraniti jezgru i kalupnu mješavinu. Također što je više pijeska uklonjenu u odjelu za čišćenje povećava se količina opreme za rukovanje i opreme za kontrolu okoliša i ljudi.

Dovođenje odljevaka iz odjela za vibracijsko čišćenje može se riješiti na nekoliko načina. Pravilna metoda ovisi o količini proizvodnje, obliku i dimenzijama odljevaka i opravdanim troškovima ljevaonice. Sve se više povećava uporaba konvejera, bilo pogonjenih ili gravitacijskih, ovjesnih ili podno montiranih tračnih konvejera. Svaki ima svoje prednosti te omogućava fleksibilnost i varijabilne troškove hlađenja, transport raznim radnim mjestima, skladištenje te u slučaju ovjesnih ne zahtijevaju podne površine.

Želja da se prihvate koncepti integrirane automatizacije je ključ budućih proizvodnih sustava. Još uvijek postoji značajni potencijal za optimiranje posebno kod završne obrade sačmanjem. Ovaj odlomak prezentira dva specifična rješenja automatizacije za sačmanje aluminijskih odljevaka.

Današnje tvornice vozila nisu samo konstruirane sa maksimalnom ugrađenom fleksibilnošću, proizvodni i montažni pogoni bi se također trebali prilagoditi kraćim proizvodnim tokovima i povećati broj specijalnih vozila. To se posebno odnosi na promjene alata i održavanje kako bi se osigurala brza i fleksibilna reakcija na različite situacije potražnje. Stoga, prilagodljiva i laka za održavanje na robotima baziran koncept je odabran kao dio automatizacije sačmalica i površinske završne obrade glava cilindara kod Volkswagen de México od početka proizvodnje.

Rösler-ov sistem sačmalica (Roboblaster RROB 350/1200-4) (sl. 3.14) [12] je konstruiran tako da glave cilindara za četvero i petero cilindrične blokove motora mogu biti potpuno automatski obrađene u sačmalici.



Slika 3.14 Automatsko sačmanje odljevaka tvrtke *Rösler* pomoću robota *Roboblaster RROB 350/1200-4* [12]

Ova dvostruka upotreba je moguća zbog specijalne konstrukcije robotske jedinice za prihvata. To je ključna komponenta sustava i od izrazite je važnosti za ispunjenje zahtjeva kupaca za visokom raspoloživošću sustava, smanjenju zastoja te također uštedi u vremenu i novcu. Osiguranje najveće stabilnosti procesa, poboljšana kvaliteta proizvodnje su među značajnijim karakteristikama sustava. Glave cilindara proizvedene niskotlačnim lijevom su očišćene od pijeska, srha i podvrgnute površinskoj završnoj obradi. Zahtijevana površinska hrapavost je 50 do 70 μm u unutarnjim i vanjskim kanalima ovih komponenata.

Glava cilindra prođe kroz cijeli proces za 36 sekundi, od kojih je 26 rukovanja a samo 10 sekundi sačmanja. Četiri 15 kW rotora sačmalice su usmjerena prema središtu komponente omogućavajući potpunu pokrivenost. Stroj je potpuno obložen pločama čelika legiranog manganom kako bi se izbjeglo pretjerano trošenje u unutrašnjosti. Kao medij koristi se čelična sačma. Ulaz sačme postavljen je direktno ispred rotora zbog izuzetno kratkog procesa sačmanja. Pregrade postavljene ispred rotora koji kontinuirano rotira nakon završetka procesa sačmanja smanjuju razinu buke i sprečavaju eventualni izlaz sačme iz bubnja za vrijeme zamjene komponenata koje se obrađuje. Posebna labirintna brtva kod komore sprečava slučajni gubitak medija. Slobodna sačma se uklanja sa komponente koja se obrađuje po završetku ciklusa okretanjem glave cilindra dok je još u komori. Jedinica za prihvata vadi komponentu iz stroja te je odlaže na okretni stol.

Glava cilindra se rotira oko X osi i transportira se na vibracijski konvejer gdje se komponenta ponovo rotira kako bi se uklonili ostaci nakon sačmanja. Injektorska mlaznica usisava sačmu na kraju stroja te je vraća nazad u proces sačmanja. Kako bi se uklonio srh i ostale nečistoće, sačma se vodi kroz kaskadnu zavojnicu spojenu na filter. Mikro čestice se usisavaju iz toka medija za sačmanje. Zdjelasti elevator tada dodaje očišćenu sačmu u spremnik sačme. Količina sačme održava se na konstantnoj razini dodavanjem nove. Cijeli proces se odvija u zatvorenoj akustičnoj komori te je buka reducirana na 75 dB. Klizna vrata na bočnim stijenama omogućavaju laganu kontrolu. Prašina se prska vodom po Venturijevom principu. Sakuplja se kao mulj na donjem dijelu filtera te se uklanja ugrađenim strugalicama u poseban spremnik. Čisti zrak sa preostalim udjelom prašine od maksimalno 20 mg/m^3 se ispušta u vanjsku atmosferu.

Maksimalna automatizacija ne vodi uvijek do najjeftinijeg rješenja. Naprotiv, tipovi komponenata i njihove različite veličine zahtijevaju povećanu fleksibilnost. Zbog zahtjeva za sve većom kvalitetom proizvoda uz simultanu potrebu za kraćim ciklusima rastu zahtjevi u tehnologiji sačmanja za obradnim centrima u kojima različite količine kompleksnih komponenata mogu biti sačmane uz visoku produktivnost i zaradu. Ljevaonica lakih metala *Schulte & Schmidt* iz Flossenbürga, naručila je od *Röslera* konstrukciju prikladnog sistema da bi postigla ekonomičnu površinsku obradu velikih količina aluminijskih tlačno lijevanih ležajeva.

Sačmalica sa kontinuiranim tumbajućim trakom tip *RMBD 500* na (sl.3.15) je dokazano rješenje posebice za aluminijski tlačni lijev koji zahtjeva posebno visok izlaz. Idealna je opcija za ljevaonice sa sistemima za sačmanje, sa ovjesnim konvejerima. Zbog svojeg velikog unutrašnjeg promjera od 520 mm, prikladna je za nježno ali u isto vrijeme izrazito ekonomičnu obradu ležajeva. Osjetljive aluminijske komponente imaju više mjesta za tumbanje u koritu. Dakle ne mogu se zaglaviti čak i pri velikom toku materijala. Osam mrežastih kaveza sa kapacitetom od 700 L obradi približno 450 komponenata u svakom kavezu (ukloni srh i nečistoće sa površine) u jednome satu. Dakle, jedan kavez je obrađen za 7,5 min. što daje vrijeme ciklusa od samo jedne sekunde po komadu! Sačmalica je prikladno dimenzionirana sa dva rotora od po 15 kW. Optimalna učinkovitost i visok stupanj ekonomičnosti su postignuti koncentriranim sačmanjem komponenata.



Slika 3.15 Tunelska sačmalica sa kontinuiranom trakom tvrtke *Rösler tip RMBD 500* [12]

4. OBILJEŽJA LIJEVANJA U PUNE KALUPE

Lijevanje u pune kalupe prvi je puta objavljeno 1958. godine u SAD-u. Kako je opisano, metoda se u početku rabila samo za pojedine odljevke, a ne za serijsku proizvodnju. Upotreba izgubljenih modela koji se mogu rasplinuti rastaljenim metalom koji ulazi u kalup omogućava ljevaču da ostavi model u kalupu pri lijevanju u pune kalupe. Time je cijeli postupak kalupljenja i lijevanja znatno izmijenjen u odnosu na tradicionalne metode. Zbog manje postojanosti oblika polistirenskih modela, oni moraju biti pažljivo tretirani pri sabijanju kalupne mješavine.

Da bi se izbjegla svaka moguća deformacija modela tijekom sabijanja, preporučuje se primjena kalupnog pijeska s duroplastičnim vezivom. Osim pijeska s CO₂ i pijeska s cementom, osobito dobre rezultate daje uporaba furanske smole, materijala koji posljednjih godina sve više dolazi u prvi plan.

Jedna od značajki lijevanja u pune kalupe je činjenica da se upotreba jezgara može bitno ograničiti ili izbjeći. Ako nije moguće izbjeći jezgre zbog kompliciranog oblika konstrukcije predviđenog odljevka, one se na prikladan način lijepe na model i umeću u kalupni pijesak.

Pri konvencionalnim postupcima lijevanja, na površinu kalupa često se nanose prevlake, kako bi se dobila kvalitetnija površina odljevka. Tu je metodu moguće primijeniti i pri lijevanju u pune kalupe na jednostavan način. U ovom se procesu prevlaka nanosi izravno na model. Dokazano je da su osobito prikladne prevlake koje sadrže grafit ili kvarcni prah. Nadalje, posebni dodaci u prevlaci mogu poboljšati prijanjanje između prevlake nanosene na model i okolnog kalupnog pijeska.

Prednosti su:

- za izradu kalupa može se primijeniti pijesak bez veziva
- dobra kvaliteta površine odljevka
- materijal modela lako se rasplinjava, tako da se litina može direktno ulijevati pri temperaturi od 500 °C i više
- postupak nije štetan za okoliš, uz gubitak pijeska od oko 5 %
- nema problema sa prijelazom debele na tanku stijenku i obratno
- relativno jeftina izrada modela
- zbog najčešće laminarnog strujanja litine tijekom ulijevanja dobiva se homogena struktura odljevka
- zahtjeva malu ili nikakvu završnu obradu odljevka
- nema potrebe za podjelom kalupa u jezgri
- velike konstrukcijske mogućnosti pri oblikovanju odljevka
- može se eliminirati upotreba jezgri
- nema srha na diobenoj ravnini odljevka
- mogućnost relativno brze izrade malih serija odljevaka koji se zatim mogu ispitivati i analizirati
- mogućnost lijevanja odljevaka male mase
- mogućnost smanjenja ukupnih troškova proizvodnje
- jednostavno vađenje odljevka iz kalupa
- moguće prilagođavanje opsega investicija
- mogućnost visokog stupnja mehanizacije i automatizacije postrojenja za lijevanje u pune kalupe.

Iako je naveden čitav niz prednosti koje pruža ovaj postupak, sumnjičavost na početku primjene bila je velika. Postupnim proučavanjem postupka uvidjelo se da je veoma dobar i upotrebljiv za odljevke koji su bili problematični prilikom lijevanja na konvencionalan način.

Nedostaci su:

- starenjem materijala za izradu modela dolazi do promjene njegovih dimenzija
- kvaliteta odljevka ovisi o kvaliteti materijala modela
- mogućnost deformacije i pucanja modela prilikom sabijanja kalupa
- mogućnost nepotpunog rasplinjavanja modela
- potreban je novi model za svaki novi odljevak.

Postupak lijevanja u pune kalupe ima mnogo prednosti, a samo nekoliko nedostataka. S obzirom da u procesu sudjeluje i dodatna komponenta (osim litine i kalupa) u obliku modela koji se rasplinjava, dolazi do međudjelovanja s ostalim komponentama. Tako se došlo do nekih kritičnih obilježja ove tehnologije.

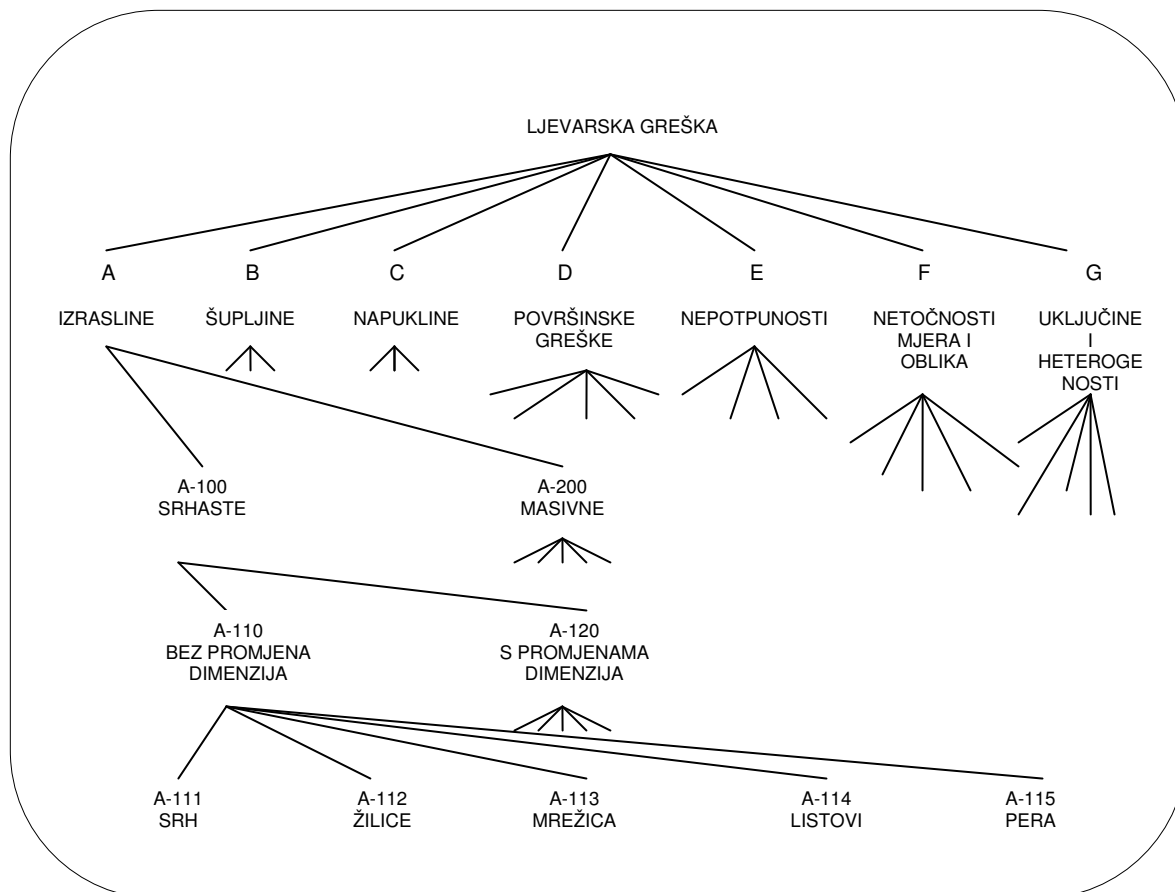
Kritična obilježja su:

- izrada modela, površinska kvaliteta modela i gustoća materijala izravno utječu na kvalitetu površine i upotrebnu vrijednost odljevka
- pri skladištenju modela treba u obzir uzeti njegovo stezanje
- za modele koji se često sastavljaju kritičan je izbor i nanošenje ljepila
- veliki utjecaj na uspjeh postupka ima ponašanje sredstva za premazivanje modela, sredstvo za premazivanje modela mora propuštati plinove, ne smije sprječavati rasplinjavanje modela i mora omogućiti odvođenje plinova i para
- pri sastavljanju tj. lijepljenju modela u grozdove treba voditi računo upotrijebljenom ljepilu koje neće djelovati na model i koje će se lako rasplinuti
- grozdovi modela trebaju biti dovoljno čvrsti i kruti da izdrže djelovanje kalupne mješavine ili pijeska pri kalupljenju i tlak litine pri ulijevanju
- za kalupnu mješavinu ili pijesak treba osigurati ravnomjernost svojstava; npr. neravnomjernost u rasporedu i veličina zrna mogu utjecati na rasplinjavanje modela jer djeluju na propusnost za plinove
- ulaganje modela i zgušnjavanje kalupnog materijala mora omogućiti potpuno točnu reprodukciju modela, a da se on pritom ne deformira ili ošteti
- kvaliteta odljevka ovisi o rasplinjavanju modela, pa i o tome treba voditi računa
- problemi kvalitete i grešaka na odljercima osobito su povezani s kvalitetom modela i njegovim rasplinjavanjem za vrijeme ulijevanja; osobito je teško spriječiti grešku koja nastaje pojavom sjajnih listića ugljika na površini ili u strukturi lijevanog željeza
- voditi računa o načinu hlađenja odljevaka, pogodnosti za vađenje iz kalupa, kao i o načinu čišćenja odljevaka.

5. GREŠKE NA ODLJEVCIMA

Od odljevka se zahtjeva da zadovoljava kako u pogledu sastava materijala, tako i u pogledu težine, kvalitete površine i samog izgleda. Uz sve navedeno, odljevak mora imati i prihvatljivu cijenu kako bi proizvod bio konkurentan. Za postizanje ovih ciljeva greške na odljercima su izrazito nepoželjne te ih se pokušava svesti na apsolutni minimum. S obzirom da vrijednost gotovog proizvoda uvelike zavisi i o postotku loših proizvoda u seriji, lijevaonice diljem svijeta svakodnevno vode brigu o smanjenju grešaka a odljercima. Broj loših odljevaka zavisi o kvaliteti osnovnog i pomoćnog materijala, o radnim uvjetima u pojedinim fazama proizvodnje i slično. Sam način rada i zainteresiranost radnika (tj. usredotočenost na operaciju koju izvodi) igra značajnu ulogu kada se govori o greškama na odljercima. Kako bi se smanjio broj loših odljevaka treba voditi računa o uzrocima, a da bi uzroke otklonili potrebno je kontinuirano pratiti proces proizvodnje i precizno utvrditi uvjete rada kojima se postiže najbolja kvaliteta odljevaka.

Klasifikaciju grešaka koje se javljaju na odljercima prvi je izradio Poljak K. Gierzejewski 1931. godine i iznio je na Međunarodnom kongresu lijevača održanom u Milanu, u Italiji. Na njegovu klasifikaciju nadovezali su se mnogi, a najnovija klasifikacija prema Međunarodnom atlasu lijevačkih grešaka (sl. 5.1) vrijedi i danas. Greške su podijeljene u grupe i podgrupe te se svaka greška dobivena na odljevku prilikom lijevanja može naći u ovoj klasifikaciji.



Slika 5.1 Klasifikacija ljevačkih grešaka [3]

Veza između uzroka i grešaka vrlo je složena. Ta veza prikazana je u (tabl. 5.1) [3]. Iz tablice se vidi da jedan uzrok može izazvati više grešaka i obrnuto. Brojnost uzroka i posljedica, složenost njihove veze i mogućeg kombiniranog djelovanja različitih uzroka, čine ljevačku proizvodnju osjetljivom na pojavu odmetka. Zbog toga je potrebna velika pažnja, stručnost i umješnost svih sudionika u procesu da bi se ljevački odmetak zadržao u prihvatljivim granicama.

+ veći uzrok

100 greška		Greška												
Greška	Neispravna epruveta										*	*		*
	Grafit									*	*			
	Neodljevenost												*	
	Inverzno otvrdnuće									*	*	*		
	Lom odljevka	*												*
	Iscurio kalup		*	*	*	*	*	*	*				*	*
	Neispravna jezgra		*	*			*	*						
	Odlupljivanje od kalupnika		*	*	*	+		+						
	Uzgon jezgre	*	*		+	*	*	*				*	+	
	Zamaknuće odljevka	*	+	*			*	*				*		
	Nedovoljna spojenost kalupa	*	*	*	*	+	*	+				*		
	Zapečenost				*	+	+	*				*		
	Penetracija	*	*	*	*	+	+	+	*			+		
	Hrapava površina	*	*	*	*	*	*	*	*	*		*		
	Odlupina mjestimična	*	+	*	*	+	*	*						
	Odlupina	*	*	+	*	+		+				*	+	
	Zgnječenost		*	+		*	*	+				*	+	
	Odlupine, širenje	*		*	*	+	*	*				*	*	
	Odlupine, erozija			*	*	+	+	+				*		
	Erozija kalupa	*			+	+	*	*				*		
	Uključine	*			+	*	*	*		*	*	*	*	
	Hladni zavar i dr. greške ulijevanja	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	Krupno zrno	*	*		*			*	+	*	*	*	*	*
	Izvitoperenost (deformiranost) odljevka	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	Mjestimična tvrdoća	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	Povišena tvrdoća					*	*		+	*	*	*	*	*
	Napukline	*	*	*	*	*	*	*	+	*	*	*	+	
	Usahline	*	*	*	*				*	*	*	*		
	Greške sačmanja		*		+	+	*	*				*		
	Površinske greške	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	Mjehuravost	*		+	*	+	+	+	+	*	+	+	*	*
		Uzrok/greška	a. Konstrukcija	b. Model	c. Kalupnik	d. Uljevni sustav	e. Kalupna mješavina	f. Jezgre	g. Kalupljenje	h. sastav litine	i. Način taljenja	j. Ulijevanje	k. Ostalo	

5.1 Greške na odljevcima pri lijevanju u pune kalupe

Važna pojava pri lijevanju u pune kalupe je mogućnost pojave grešaka na odljevcima.

Povezane su s:

- izradom modela
- sastavljanjem modela
- premazivanjem modela
- odvijanjem procesa lijevanja.

Većina grešaka koja se pojavljuje pri lijevanju u pune kalupe je ista kao i kod lijevanja odljevaka u jednokratne pješčane kalupe. Dodatni utjecaj na pojavu grešaka ima sagorivi model koji se rasplinjuje prilikom ulijevanja litine.

Tablica 5.2 Opisno prikazuje tipične greške pri lijevanju odljevaka u pijesak bez veziva. [3]

Teškoće	Uzrok	Način izbjegavanja
Pješčana konstrukcija puca i fluidizira se lančanom reakcijom koja daje metalnu grudu.	Uključivanje zraka u čaški. Plin od isparavanja fluidizira pijesak. Sporo ulijevanje uzrokuje pucanje između metala i modela. Pijesak nije sabijen. Utezi male mase. Udar metala na pijesak.	Poboljšati konstrukciju čaške. Primijeniti čašku od keramike. Primijeniti spust s čepom. Brže ulijevati. Povećati masu utega. Podebljati prevlaku na modelu. Povećati propusnost.
Smicanje ili pojava odebljanja (manje bubrenje ili izobličenje).	Utezi male mase. Slaba prevlaka. Udar metala. Pijesak nije sabijen.	Povećati masu utega. Podebljati prevlaku na modelu. Pojačati sabijanje. Osigurati odušak plinova iz modela pomoću pletiva ili šljunka. Podebljati prevlaku na modelu.
Defekt vrućeg plina (model se lomi ili izobličuje prije ulaska metala).	Vrući plinovi nastali isparavanjem filtriraju se kroz pijesak i oštećuju dijelove modela.	Povećati propusnost. Promijeniti uljevni sustav.

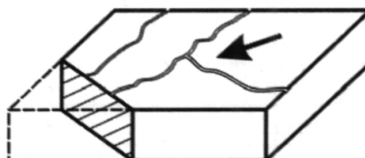
Neke od grešaka na odljevcima uzrokovane kalupnim materijalom i kalupljenjem prikazane su na (sl. 5.2 ... 5.11). [3]

A – IZRASLINE

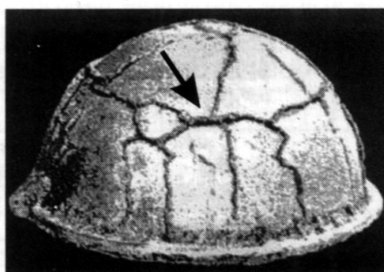
A – 112 – FM

ŽILICE

SKICA GREŠKE:



FOTOGRAFIJA GREŠKE:



FM*

Slika 5.2 Uzvisine na gornjoj površini odljevka [3]

Opis greške:

Izbočenja u obliku žilica u pravilu su okomita na površinu odljevka. Pojavljuju se pojedinačno ili kao mreža te nisu smještene uzduž razdjelne plohe. Kod sirovih kalupa pojavljuju se često s greškom D-230 ili A-211.

Mogući uzroci greške:

Napuknuće površine kalupne šupljine uslijed stezanja izazvanog prebrzim zagrijavanjem, prevelike količine veziva ili vlage. Površinsko napuknuće za vrijeme ulijevanja, ako je kalup previše sabijen.

Otklanjanje greške:

Podesiti sastav kalupne mješavine, povećati krutost kalupnika, smanjiti metalostatski tlak. Smanjiti udio vode i veziva i/ili povećati količinu ugljene prašine.

B – MJEHURAVOST

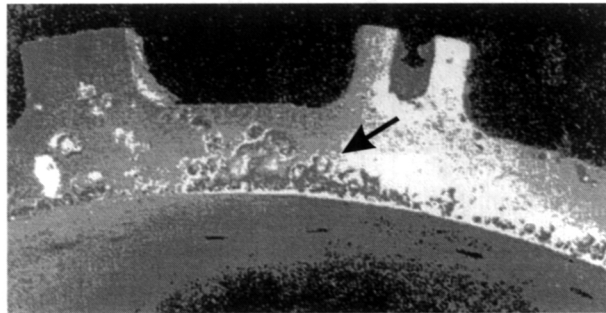
B – 121 – FM

POVRŠINSKA/SUBPOVRŠINSKA MJEHURAVOST

SKICA GREŠKE:



FOTOGRAFIJA GREŠKE:



FM *

Slika 5.3 Mjehuravost na površini odljevka [3]

Opis greške:

Zaobljene šupljine glatkih stijenki u obliku spljoštenih mjehurića smještene pojedinačno ili u grupama na blizu površine odljevka. Ako nisu vidljive na površini, obično su ispod tankog sloja metala i stoga neuočljive prije sačmanja ili obrade. Pojavljuju se i kao sjajna mjesta.

Mogući uzroci greške:

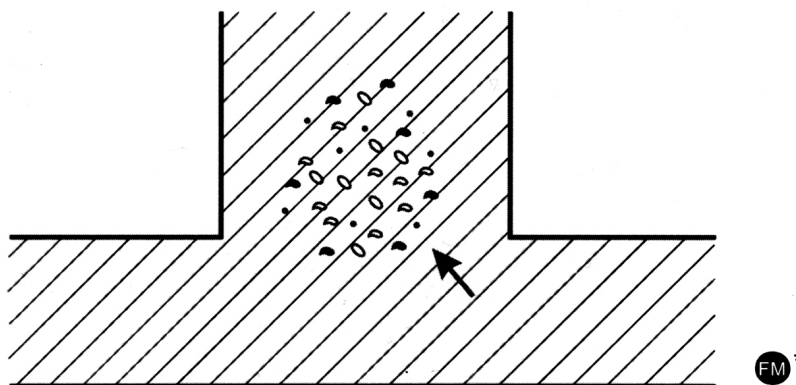
Pri rasplinjavanju modela, mjehurići zraka i plina ne mogu izaći u atmosferu i uzdižu se zbog uzgona prema gornjoj površini odljevka. Izlaz u atmosferu je onemogućen zbog premale propusnosti kalupa.

Otklanjanje greške:

Povećati propusnost kalupa povećanjem granulacije pijeska.

MIKRO I MAKRO POROZNOST

SKICA GREŠKE:



Slika 5.4 Shematski prikaz mikro i makro poroznosti [3]

Opis greške:

U aluminijevom ljevu relativno visoka temperatura ulijevanja potrebna za rasplinjavanje modela može izazvati ukljućine od veće količine razvijenog plina, a time i pojavu poroznosti. Greška se otkriva tek nakon ispitivanja odljevaka pod tlakom ili pri galvanizaciji. Na površini odljevka vidi se rijedak spužvast materijal ili sitna poroznost. Obično nastaje na mjestima koja se najkasnije skrućuju ili na mjestima gdje su izbočeni dijelovi kalupa.

Mogući uzroci greške:

Greška nastaje zbog skrućivanja, hlađenja i skupljanja materijala, pri nepovoljnom napajanju usahlina. Dolazi do izdvajanja plinova iz kalupa i litine tijekom skrućivanja.

Otklanjanje greške:

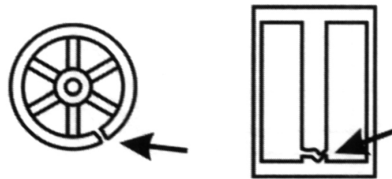
Treba ostvariti optimalan tlak u zoni rasplinjavanja, dobru propusnost za plinove, te pjenastom polistirenu dodati sredstva koja ubrzavaju rasplinjavanje.

C – NAPUKLINE

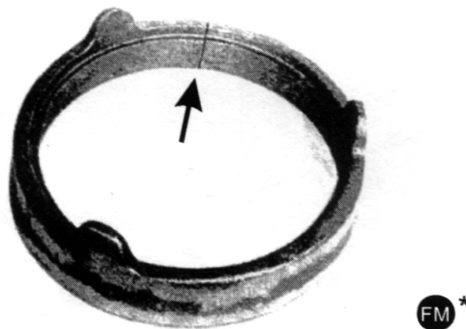
C – 211 – FM

HLADNA NAPETOSNA PUKOTINA

SKICA GREŠKE:



FOTOGRAFIJA GREŠKE:



Slika 5.5 Napuklina na vanjskom rubu odljevka [3]

Opis greške:

Pukotina oštih rubova i neoksidirane površine, očekuje se u posljednjem skrućenom dijelu odljevka uslijed napetosti uzrokovanih hlađenjem. Obično preko cijelog presjeka.

Mogući uzroci greške:

Kriva konstrukcija odljevka, neodgovarajući uljevni sustav i pojila, prevelika sabijenost kalupa.

Otklanjanje greške:

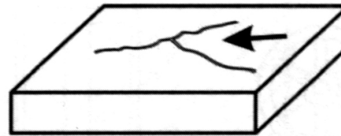
Upotreba hladila. Ispraviti konstrukciju odljevka i poboljšati uljevni sustav radi boljeg hlađenja svih dijelova odljevka. Smanjiti sabijenost i čvrstoću kalupa.

D – POVRŠINSKE GREŠKE

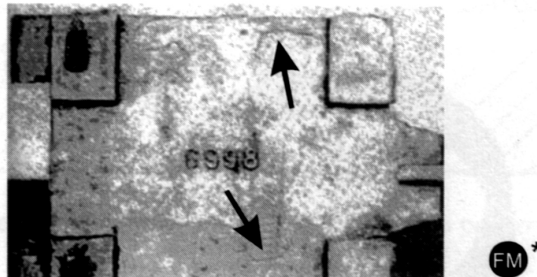
D – 113 – FM

BRAZGOTINE

SKICA GREŠKE:



FOTOGRAFIJA GREŠKE:



Slika 5.6 Brazgotine [3]

Opis greške:

Povezani valoviti nabori male udubine na površini odljevka. Često se javlja na horizontalnim i izbočenim površinama tankih odljevaka.

Mogući uzroci greške:

Površina odljevka je prije skrućivanja hladnija od unutarnjeg dijela odljevka pa je metalostatski tlak nedovoljan da izravna brazgotine uslijed kožice oksida na površini.

Otklanjanje greške:

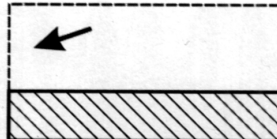
Upotrijebiti zasipni materijal s niskim sadržajem kisika i sumpora, povišiti temperaturu ulijevanja, skratiti uljevno vrijeme većim presjekom uljevnog sustava i upotrijebiti bolju kvalitetu veziva.

E – NEPOTPUN ODLJEVAK

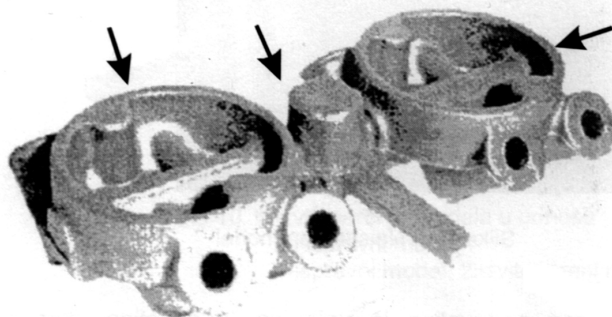
E – 122 – FM

NEISPUNJENOST

SKICA GREŠKE:



FOTOGRAFIJA GREŠKE:



Slika 5.7 Neispunjenost odljevka [3]

Opis greške:

Uljevni sustav je ispunjen, a veći dio odljevka nedostaje.

Mogući uzroci greške:

Prijevremeni prekid ulijevanja, nedovoljna količina litine u loncu, niska uljevna temperatura, mala metalostatska visina, model od polistirena visoke gustoće, nedovoljno dobro dimenzioniran uljevni sustav.

Otklanjanje greške:

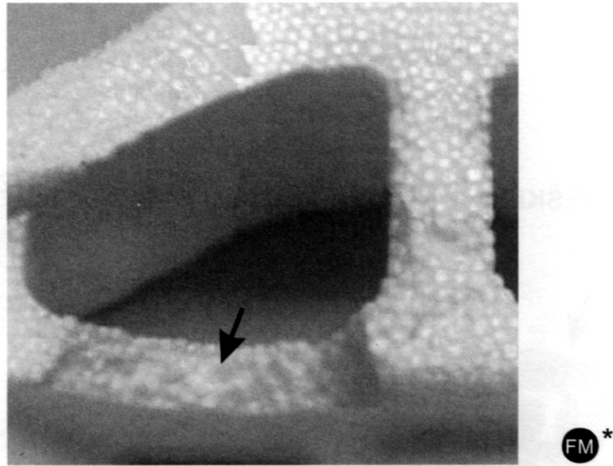
Povećati temperaturu ulijevanja i metalostatsku visinu te postaviti oduške na modelu. Koristiti polistiren niže gustoće, dobro dimenzionirati uljevni sustav te povećati volumen čaške.

F – NETOČNOST MJERA I OBLIKA

F – 211 – FM

NEISPRAVAN MODEL

FOTOGRAFIJA GREŠKE:



Slika 5.8 Neispravan model [3]

Opis greške:

Slika prikazuje grube nepravilne pogreške na modelu. Pjenasti polistiren nedovoljno je upjenjen te nema međusobnog spoja polistirenskih zrna. Prevelika izloženost visokoj temperaturi kalupa dovodi do izvitoperenja modela.

Mogući uzroci greške:

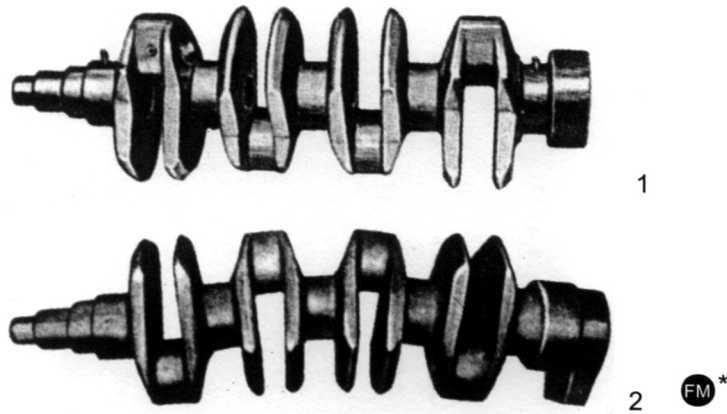
Hladna površina kalupa ili nepravilno zagrijavanje parom.

Otklanjanje greške:

Regulirati temperaturu površine kalupa i parom ga pravilno zagrijavati.

IZVITOPERENJE MODELA

FOTOGRAFIJA GREŠKE:



Slika 5.9 Izvitoperenje modela u odnosu na ispravni model [3]

- 1 – ispravni model,
- 2 – izvitopereni model

Opis greške:

Opće ili lokalno izvitoperenje modela uzrokuje izvitoperene kalupa, a time i odljevka.

Mogući uzroci greške:

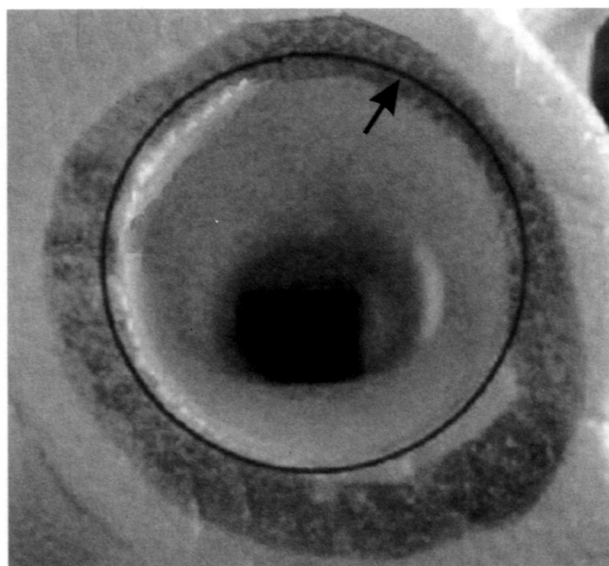
Loša izrada ili konstrukcija modela ili neodgovarajuće skladištenje modela u vlažnoj prostoriji.

Otklanjanje greške:

Provjeriti konstrukciju, izradu i skladištenje modela kako bi se izbjeglo njegovo izvitoperenje.

IZVITOPERENJE MODELA

FOTOGRAFIJA GREŠKE:



Slika 5.10 Netočne dimenzije i izvitoperenje modela [3]

Opis greške:

Zrna polistirena nakon vađenja iz kalupa se šire, pa dolazi do izvitoperenja i netočnih dimenzija modela.

Mogući uzroci greške:

Nedovoljno ili neprecizno temperiranje hlađenja kalupa ili prerano vađenje modela iz kalupa.

Otklanjanje greške:

Točno regulirati hlađenje kalupa i ne vaditi model iz njega prerano.

G - UKLJUČINE I HETEROGENOSTI

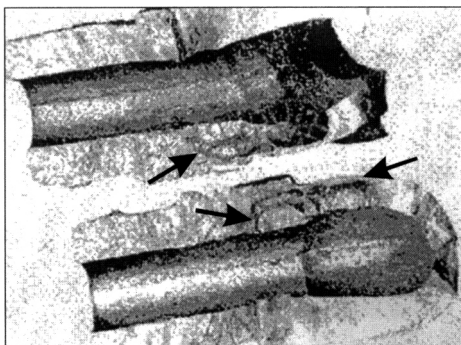
G – 143 – FM

UKLJUČINE SJAJNOG GRAFITA

SKICA GREŠKE:



FOTOGRAFIJA GREŠKE:



FM*

Slika 5.11 Grafitni film na površini i prijelomu odljevka kod lijevanog željeza s kuglastim grafitom [3]

Opis greške:

Tanki sjajni grafitni filmovi obično vidljivi na prijelomu, ali i na površini odljevka. Nepravilna su oblika.

Mogući uzroci greške:

Ugljikovodici koji se nalaze kao dodaci u kalupnoj mješavini stvaraju film «sjajnog ugljika» na površini dodira kalupa s modelom. On zaostaje zarobljen u odljevku.

Otklanjanje greške:

Smanjiti udio materijala u kalupnoj mješavini od kojih bi mogao nastati sjajni ugljik.

6. ISPITIVANJE LIVLJIVOSTI METALA PRI UPOTREBI POLISTIRENSKIH MODELA

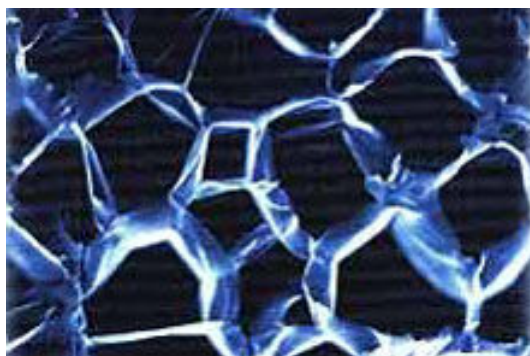
Sastavni dio ovog rada je i provođenje lijevanja u pune kalupe u pogonskim uvjetima. Lijevanje je provedeno na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu u laboratoriju za ljevarstvo.

U prvom koraku bilo je potrebno odabrati materijal za izradu modela te specificirati njegove dimenzije. S obzirom da modeli moraju biti od polistirena, preostao je odabir gustoća za provedbu ispitivanja. Kako je ranije navedeno u praksi se ne primjenjuju polistirenske pjene s gustoćom iznad 32 kg/m^3 . Za provedbu ispitivanja odabrane su tri različite gustoće i to redom $\rho = 12 \text{ kg/m}^3$, $\rho = 20 \text{ kg/m}^3$, $\rho = 30 \text{ kg/m}^3$. Ploče iz kojih su rezani modeli su dimenzija $1000 \times 500 \text{ mm}$. Modeli se mogu pripremiti rezanjem vrućom žicom ili tračnom pilom. Zbog lakšeg rukovanja velikim pločama rezanje modela prema zahtjevima konstrukcije kalupa izvedeno je na tračnoj pili. Dimenzije polistirenskih modela za probno lijevanje su $30 \times 30 \times 500 \text{ mm}$, a dimenzije polistirenskih modela uz određena poboljšanja su $15 \times 15 \times 350 \text{ mm}$ (Š x V x D).

Prikaz čelijaste strukture polistirena korištenog pri ispitivanjima na (sl. 6.1 ... 6.2) [13].



Slika 6.1 Granule polistirena [13]



Slika 6.2 Čelijasta struktura polistirena [13]

Mehanička svojstva

Većina mehaničkih svojstava ovisi o gustoći materijala. Važno mehaničko svojstvo polistirena je njegova tlačna čvrstoća. EPS (ekspandirani polistiren) gustoće 12 kg/m^3 , na primjer, doseže granicu elastičnosti kod 2% stišnjavanja. Daljnje opterećenje vodi do trajnih deformacija. Podaci o svim karakteristikama su prikazani u (tabl. 6.1) [13].

Tablica 6.1 Kemijska svojstva polistirena [13]

Kemijska svojstva	
Voda, morska voda	Postojan
Uobičajeni građ. materijali kao vapno, cement, gips	
Razrijeđene kiseline, alkali	
Bitumen	Uvjetno postojan
Ljepila i boje na bazi vode	
Alkohol	
Parafinska ulja, biljna i životinjska ulja i masti	Nepostojan
Dizelsko gorivo, vazelin	
Hladni bitumen i bitumenske mase sa razrjeđivačima (Resitol)	
Životinjsko gnojivo	
Razrjeđivači (acetone, eter, nitro, benzol)	
Normal i Super benzin	

Termička svojstva

Maksimalna dozvoljena radna temperatura za EPS materijale, kao i za sve termoplastične materijale, ovisi o trajanju i intenzitetu opterećenja povišenom temperaturom. Ako nije pod velikim opterećenjem polistiren podnosi kratkotrajnu temperaturu do 95°C . No, ako se upotrebljava bitumen ili vrući premazi koji zahtijevaju višu temperaturu na kratki period, polistiren može pretrpjeti i temperaturu do 110°C . S povećanjem gustoće polistirena povećava se i otpornost na povišene temperature, ali granična vrijednost ostaje ista. Maksimalna trajna temperatura neopterećenog polistirena iznosi 85°C .

Polistiren kao amorfni polimer ne pokazuje nikakve strukturalne promjene od temperature -180°C do 100°C tako da su i ekstremno niske trajne temperature moguće.

Polistiren ima izrazito malu toplinsku vodljivost. Stoga su toplinsko-izolaciona svojstva izvrsna. Toplinska vodljivost ovisi o temperaturi i gustoći. Toplinska vodljivost je manja od zahtijevane po normama (0,040 W/m K) što se vidi u (tabl. 6.2) [13]. Porastom gustoće polistirena toplinska vodljivost pada (bolje izolaciono svojstvo).

Zapaljivost

Poduzeće gdje je polistiren kupljen proizvodi isključivo samogasivi polistiren. On u dodiru sa plamenom ne gori nego se samo otplinjava, a pri uklanjanju plamena prestaje otplinjavati. U normama je klasificiran kao B1 odnosno "teško zapaljiv materijal".

Difuzija vodene pare, apsorpcija vode

S povećanjem gustoće polistirena raste i otpor difuziji vodene pare što se može vidjeti iz podataka u (tabl. 6.2) [13]. S obzirom da polistiren nije topljiv u vodi niti bubri u vodi, on ne upija skoro ništa vode. I nakon što je 28 dana potopljen u vodi može upiti vode do maksimalno 4% svoga volumena (znači samo površinski). To je iznimno važno zato jer se ne pogoršavaju njegova toplinsko-izolaciona svojstva.

Reciklaža

Pri rezanju polistirena iz blokova u ploče ili kod završene upotrebe polistirena za pakiranje i sl., polistiren se može reciklirati na mnogo načina. Može, između ostalog, biti vraćen dijelom u novi EPS, koristiti se kao lagani agregat, dodavati se u tlo da bi se postigla bolja prozračenost tla bez štetnih utjecaja na vodu i atmosferu.

Oznake

npr. **12 - S**:

- **12** označava masu polistirena po m³ [kg/m³]
- **S** označava samogasivost (samogasiv polistiren je onaj koji ne gori nego pri povišenim temperaturama rasplinjava)

Slijedi tablični prikaz tehničkih podataka polistirena korištenih u svrhu ispitivanja livljivosti aluminijske pri lijevanju pune kalupe.

Tablica 6.2 Tehnički podaci polistirena [13]

Oznaka		12 – S	20 – S	30 – S
Gustoća	[kg/m ³]	12	20	30
Toplinska provodljivost pri 10 °C	W/mK	0,036 – 0,038	0,033 – 0,036	0,031 – 0,035
Računska toplinska provodljivost	W/mK	0,041	0,038	0,035
Tlačna čvrstoća uz 10 % deformaciju	kPa	60 – 110	110 – 160	200 – 250
Tlačna čvrstoća uz 2 % deformaciju	kPa	15 – 25	25 – 40	45 -60
Čvrstoća na savijanje	kPa	60 – 300	150 – 390	330 – 570
Modul elastičnosti pri tlaku	N/mm ²	0,6 – 5,2	3,4 – 7,0	7,7 – 11,3
Maksimalna temp. pod tlačnim naponom				
- kratkotrajno	°C	100	100	100
- dugotrajno pod opterećenjem 20 kPa	°C	75	80	80
Upijanje vode, volumenski dio				
7 – dnevno uranjanje	%	0,5 – 1,5	0,5 – 1,5	0,5 – 1,5
28 – dnevno uranjanje	%	1,0 - 3,0	1,0 - 3,0	1,0 - 3,0
Relativni otpor difuziji vodene pare	1	20 - 50	30 - 70	40 - 100
Zapaljivost	Teško zapaljiv			

6.1 Probno lijevanje

S obzirom na kompleksnost tehnologije lijevanja u pune kalupe, potrebno je izraditi probne modele i odljevke. Modeli dimenzija 30 x 30 x 500 mm te gustoća $\rho = 12 \text{ kg/m}^3$ i $\rho = 30 \text{ kg/m}^3$ korišteni su za probno lijevanje. Na (sl. 6.3) prikazan je model za probno lijevanje.



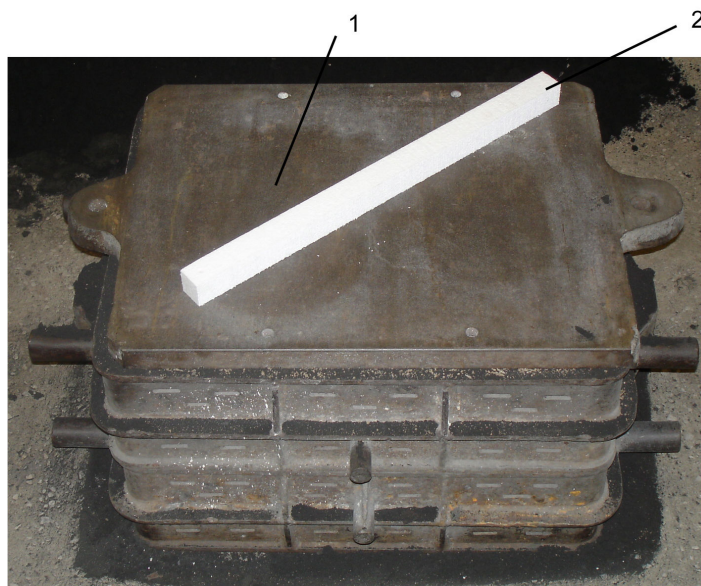
Slika 6.3 Polistirenski model za probno lijevanje

Na (sl. 6.4) prikaz je modela spusta probnog lijevanja načinjenog od drva.

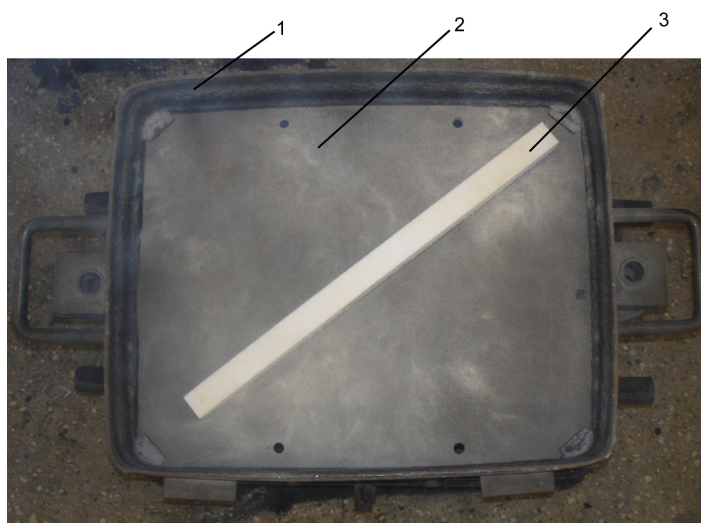


Slika 6.4 Model spusta

Nakon odabira modela i modela spusta, pristupilo se operaciji kalupljenja modela. Proces kalupljenja opsežno je opisan u poglavlju 3.3 ovoga rada. Slijede prikazi kalupljenja modela prije probnog lijevanja na (sl. 6.5 ... 6.6).



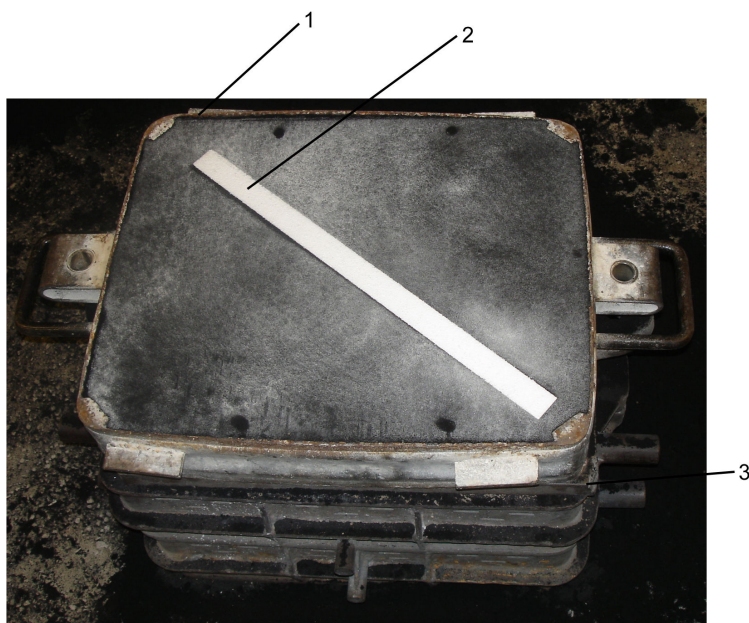
Slika 6.5 Prikaz kalupljenja
 1 – modelna ploča
 2 – polistirenski model



Slika 6.6 Prikaz kalupljenja
 1 – kalupnik
 2 – modelna ploča
 3 – polistirenski model

Za izradu kalupa korišteni su kalupnici 350 x 500 x 150 (Š x D x V) mm i kalupna mješavina kvarcnog pijeska sa 8 % bentonita i 4 % vode. Model je zasipan modelnim pijeskom (prosijani kaluparski pijesak) koji je pažljivo sabijen kako ne bi došlo do oštećenja modela ili njegovog izvitoperenja. Ostatak kalupnika popunjen je kalupnom mješavinom koja se sabila do potrebne tvrdoće.

Tvrdoća kalupa izmjerena je i iznosi 75 GF. Vrh kalupa tada se poravnava. Na taj način dobiva se donjak te se pristupa izradi gornjaka. Prikaz gotovog donjaka slijedi na (sl. 6.7).

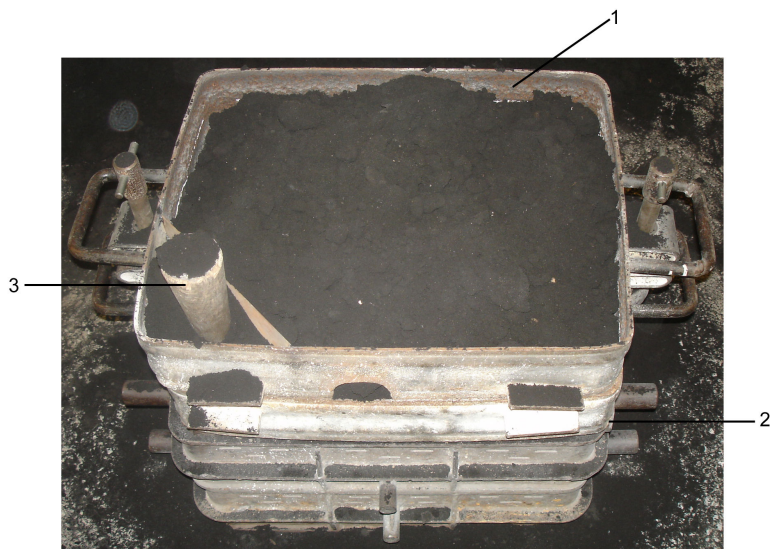


Slika 6.7 Sabijen donjak

- 1 – kalupnik
- 2 – polistirenski model
- 3 – modelna ploča

Izrada gornjaka malo je složenije izvedena od donjaka. Kalup je popunjen samo do 50 % visine (75 mm) radi potrebne propusnosti i sabijen na 75 GF, dok je uljevni sustav pune visine radi potrebe metalostatske visine prilikom ulijevanja litine.

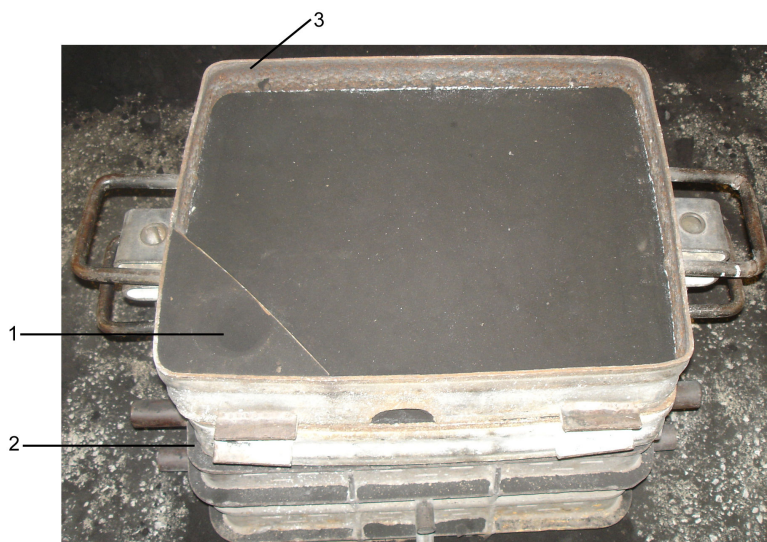
Na (sl. 6.8) prikazan je gornjak sa izvedenom pregradom radi ranije opisane potrebe za metalostatskom visinom ulijevanja.



Slika 6.8 Popunjavanje gornjaka

- 1 – gornjak
- 2 – donjak
- 3 – spust

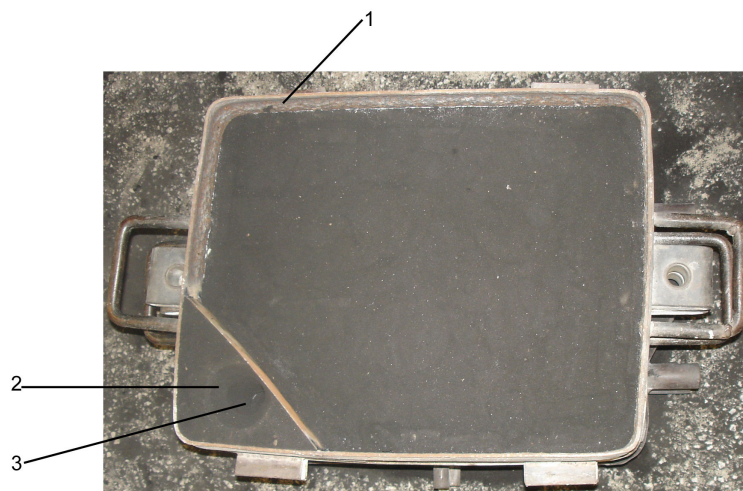
Na (sl. 6.9) prikazan je sklopljeni kalup, neposredno prije ulijevanja litine.



Slika 6.9 Sabijen kalup

- 1 – spust
- 2 – donjak
- 3 – gornjak

Čaška je ručno obrađena radi lakšeg ulijevanja litine. Višak pijeska je očišćen i ispuhan sa vrha donjaka kako ne bi došlo do uključina i grešaka na odljevcima. Na (sl. 6.10) prikazan je sklopljen kalup i završna obrada čaške.



Slika 6.10 Gotov kalup

- 1 – gornjak
- 2 – čaška
- 3 – spust

Za probno lijevanje je korišten aluminij, rastaljen u elektropeći i zagrijan na 690 °C (sl. 6.11).



Slika 6.11 Peć

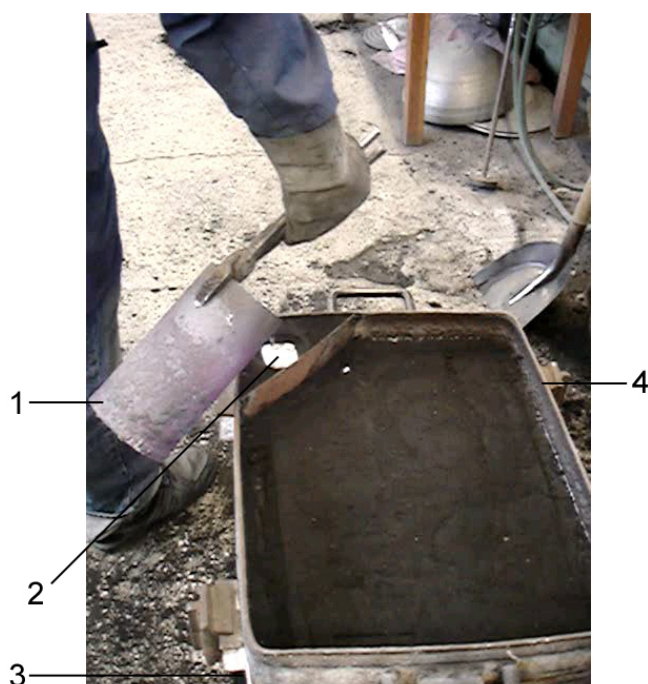
Mjerenje temperature potrebne za probu rađeno je pirometrom (sl. 6.12)



Slika 6.12 Pirometar

Postupak ulijevanja litine u kalup izveden je ručno. Zbog relativno nižih temperatura, za razliku od sivog lijeva pri čemu bi lijevanje bilo na oko 1380 °C do 1400 °C, ne postoji opasnost od eksplozije ili razvijanja ekstremnih tlakova u kalupu.

Prikaz ulijevanja litine je na (sl. 6.13).



Slika 6.13 Ulijevanje litine

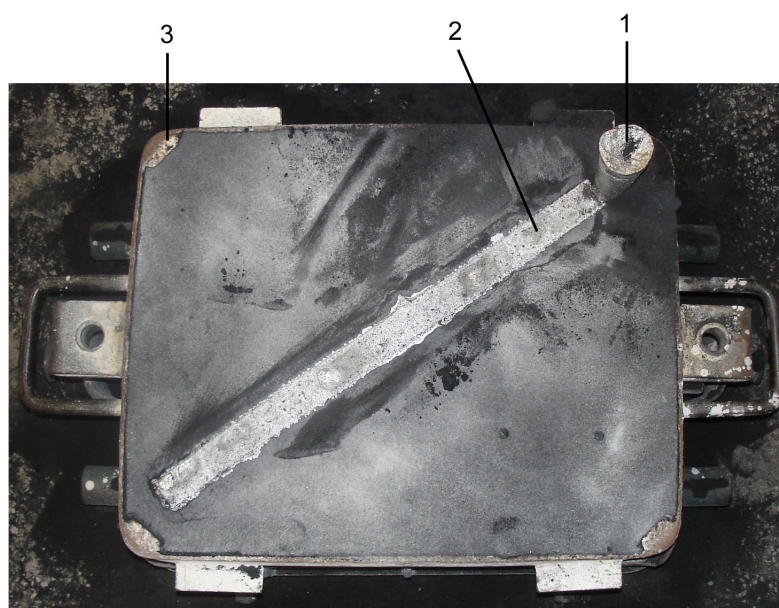
- 1 – ljevački lonac
- 2 – litina
- 3 – donjak
- 4 – gornjak

Nakon ulijevanja te hlađenja odljevaka, predloženi su rezultati probnog lijevanja. Kako je i bilo očekivati, poznajući teoriju lijevanja u pune kalupe, moglo se otprilike pretpostaviti rezultate. Na (sl. 6.14 i 6.16) vidi se kako je polistiren veće gustoće (30 kg/m^3) sagorio osjetno manje (svega 350 mm) dok je polistiren niže gustoće (12 kg/m^3) sagorio do kraja (500 mm) (sl. 6.15 i 6.17).



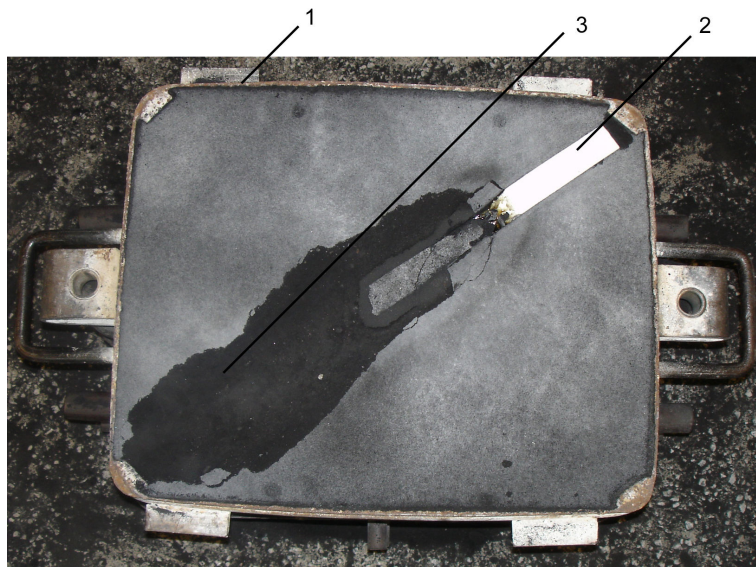
Slika 6.14 Odljevak lijevan korištenjem polistirena gustoće 30 kg/m^3

- 1 – odljevak
- 2 – gornjak

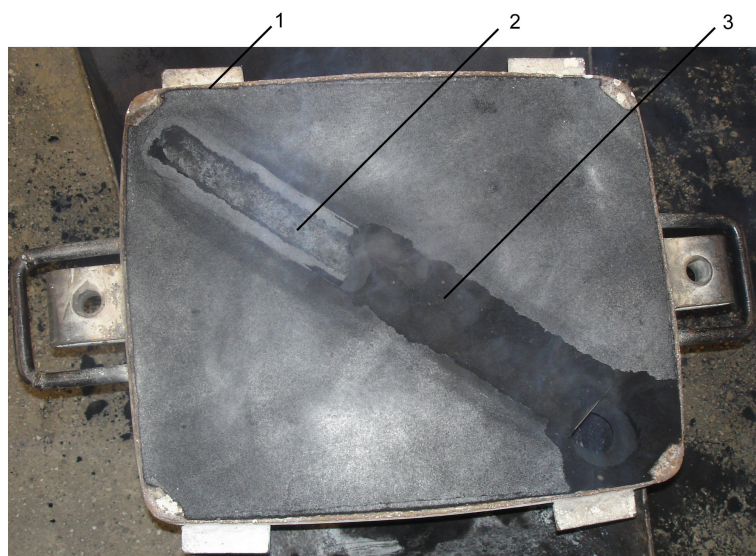


Slika 6.15 Odljevak lijevan korištenjem polistirena gustoće 12 kg/m^3

- 1 – odljevak spusta
- 2 – odljevak
- 3 – donjak



Slika 6.16 Sagoreni polistirenski model gustoće 30 kg/m^3 u kalupu
 1 – donjak
 2 – sagoreni polistirenski model
 3 – oštećen kalup prilikom vađenja odljevka

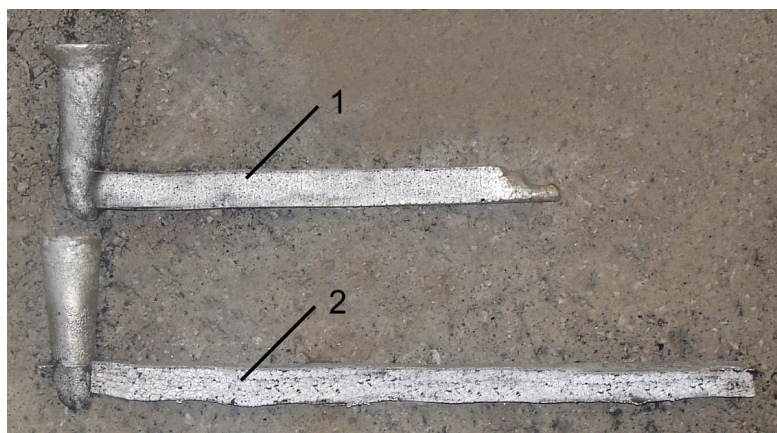


Slika 6.17 Sagoreni polistirenski model gustoće 12 kg/m^3
 1 – donjak
 2 – potpuno sagoreni polistirenski model
 3 – oštećen kalup prilikom vađenja odljevka

Čaška i spust su u oba slučaja isti. Visina modela spusta je 100 mm. Odljevak spusta je niži 10 mm te iznosi 90 mm. To je posljedica skrućivanja litine prilikom hlađenja u kalupu.

Na (sl. 6.18) prikazani su probni odljevci. Jasno je vidljivo da je litina daleko više sagorila polistirena niske gustoće nego polistirena visoke gustoće.

Može se zaključiti da je jedan od faktora lijevanja u pune kalupe, svakako gustoća polistirenskog modela.



Slika 6.18 Probni odljevci dobiveni korištenjem polistirenskih modela različitih gustoća

1 – odljevak dobiven korištenjem polistirenskog modela gustoće 30 kg/m³

2 – odljevak dobiven korištenjem polistirenskog modela gustoće 12 kg/m³

Podrobnijim razmišljanjem i analizom rezultata može se zaključiti da je probno lijevanje uspješno odrađeno te se može pristupiti daljnjim pokusima.

Na temelju ovih rezultata ne može se sa sigurnošću ustvrditi da li bi odljevak dobiven korištenjem polistirena niže gustoće možda bio i duži, ako bi se koristio model veće duljine. Što znači da bi smo trebali vršiti određene prilagodbe modela i uljevnoga sustava. Nadalje, svakako treba voditi računa o temperaturi litine. Pri ovoj probi korištena je temperatura lijevanja od 690 °C.

Poželjno je izvršiti ispitivanja uz promjenu temperature aluminijske te uz korištenje polistirenskih modela različitih gustoća. Idući faktor o kojemu treba voditi računa je i metalostatska visina ulijevanja. U ovom slučaju korištena je «puna visina» kalupa od 150 mm.

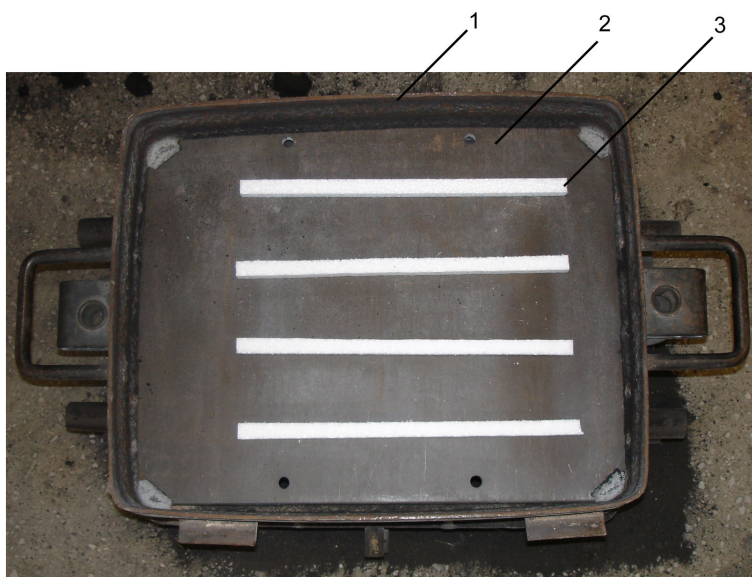
Uz gore navedene opaske provesti će se lijevanje aluminijske u pune kalupe kako bi se osigurali uvjeti za dobivanje kvalitetnih odljevaka.

6.2 Lijevanje uz određena poboljšanja

U ovoj fazi pristupilo se lijevanju uz korištenje polistirena gustoće $\rho = 12 \text{ kg/m}^3$, $\rho = 20 \text{ kg/m}^3$ i $\rho = 30 \text{ kg/m}^3$. Polistirenski modeli, kako je navedeno u uvodu dimenzija su $15 \times 15 \times 350 \text{ mm}$ (Š x V x D). Četiri modela stavljena su u jedan kalup zbog pojednostavljenja pokusa i održavanja što konstantnije temperature ulijevanja. Svaki model ima svoj uljevni sustav, nisu korišteni razdjelnici.

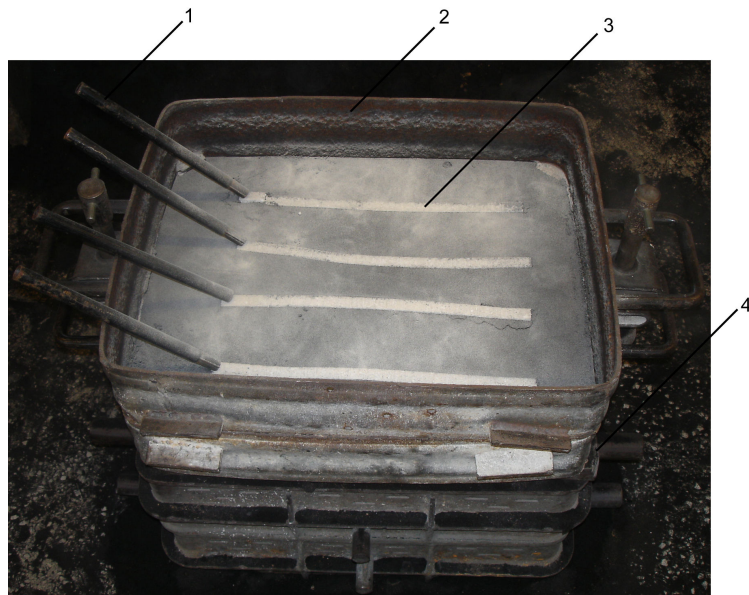
Pripremljena su dva kalupa te u svakome modeli jedne gustoće. Oba kalupa kalupljena su na identičan način. Lijevanje je vršeno uz potpuno popunjen kalup tj. do visine 150 mm te uz kalup popunjen do visine 75 mm, jednolike sabijenosti. Sabijanje je vršeno ručno uz pomoć pneumatskog čekića.

Slijedi prikaz kalupljenja prije ulijevanja litine u pune kalupe (sl. 6.19 ... 6.20).



Slika 6.19 Modeli na modelanoj ploči

- 1 – kalupnik
- 2 – modelna ploča
- 3 – polistirenski model

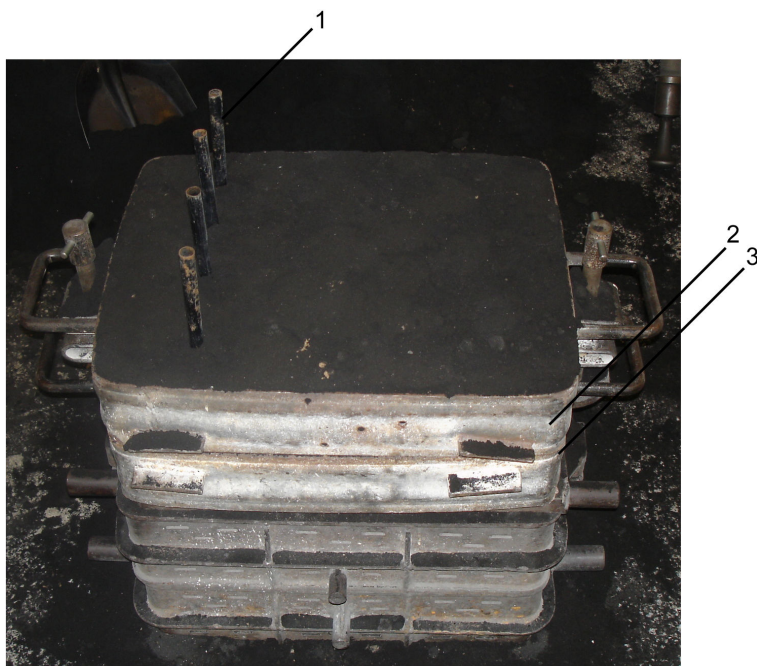


Slika 6.20 Modeli u sabijenom donjaku

- 1 – model spusta
- 2 – kalupnik gornjaka
- 3 – polistirenski model
- 4 – donjak

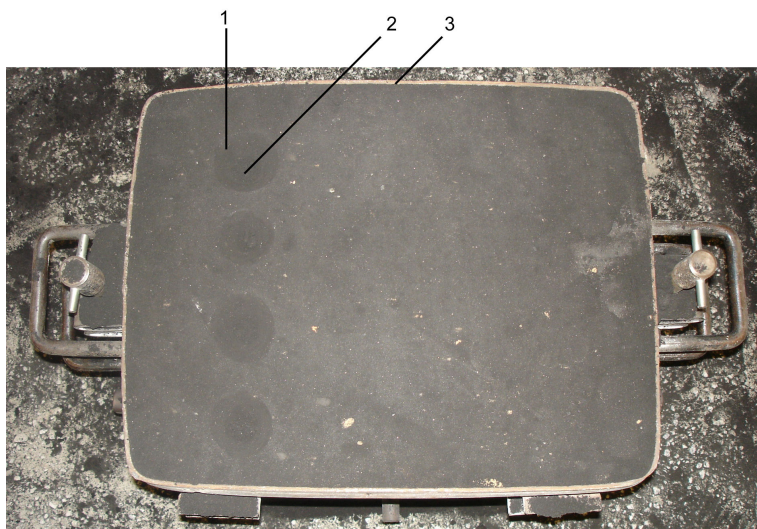
Na (sl. 6.20) vidi se nepravilna položaj modela spusta. Zbog vrlo malog promjera $\Phi = 10 \text{ mm}$ i potrebe konstrukcije (da spust ide direktno na polistirenski model) kalup se mora postepeno popunjavati pijeskom te onda ručno učvrstiti model spusta. Na taj način operaciju može izvesti jedan radnik te nema potrebe za dodatnom pomoći.

Spust je morao biti uži (promjera 10 mm) kako bi bili dobiveni što vjerodostojni rezultati (sl. 6.21). Izrađen kalup prije ulijevanja litine prikazan je na (sl. 6.22).



Slika 6.21 Sabijen kalup neposredno prije vađenja modela spusta i popunjen do visine 150 mm

- 1 – model spusta
- 2 – gornjak
- 3 – donjak



Slika 6.22 Izrađeni kalup te popunjen do visine 150 mm

- 1 – čaška
- 2 – spust
- 3 – gornjak

Kalup popunjen do visine 75 mm i sabijen prikazan je na (sl. 6.23).

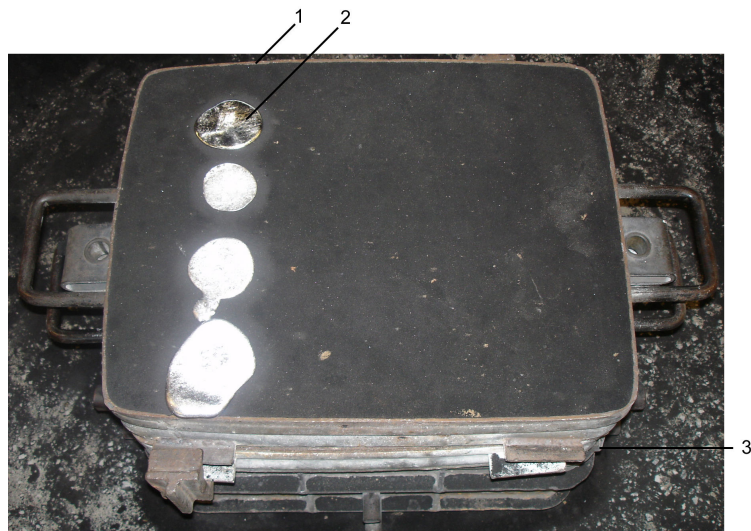


Slika 6.23 Kalup pun do visine 75 mm i sabijen
1 – gornjak
2 – uljevni sustav

Sama operacija ulijevanja izvršena je na identičan način kao i kod probnog lijevanja, dakle ručno. Treba paziti prilikom ulijevanja jer se ono izvodi naizmjenice. Prvo je bio odliven jedan model u jednom kalupu pri određenoj temperaturi te odmah idući model ali u drugome kalupu.

Takvim načinom ulijevanja postigla se konstantna temperatura prilikom ulijevanja uz promjenu kalupa, odnosno gustoće modela. Prvo su naizmjenice lijevani kalupi sa modelima od polistirena gustoće $\rho = 12 \text{ kg/m}^3$ i $\rho = 30 \text{ kg/m}^3$ uz potpuno popunjen kalup.

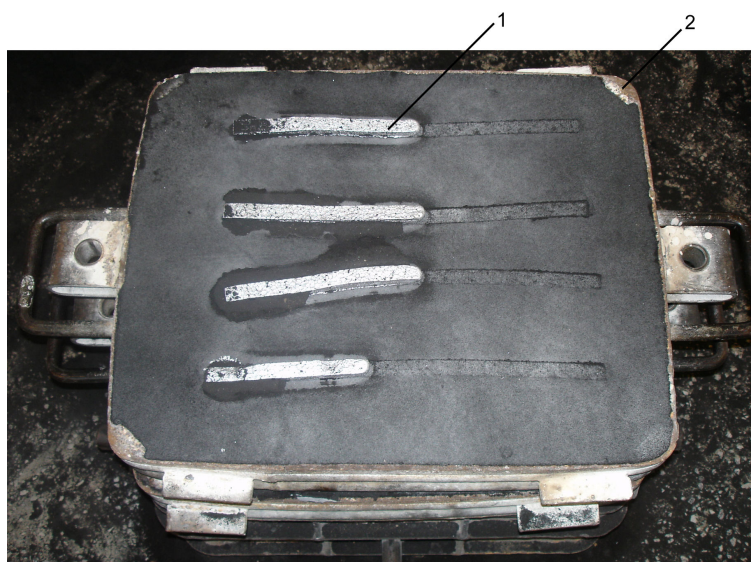
Zatim su korišteni modeli iste gustoće ali uz korištenje kalupa koji je popunjen do visine 75 mm. Na kraju su napravljena dva kalupa, jedan pun do vrha, a drugi do visine 75 mm uz korištenje polistirenskih modela gustoće $\rho = 20 \text{ kg/m}^3$. Slijedi prikaz odljevaka u kalupu na (sl. 6.24).



Slika 6.24 Odljevci u kalupu

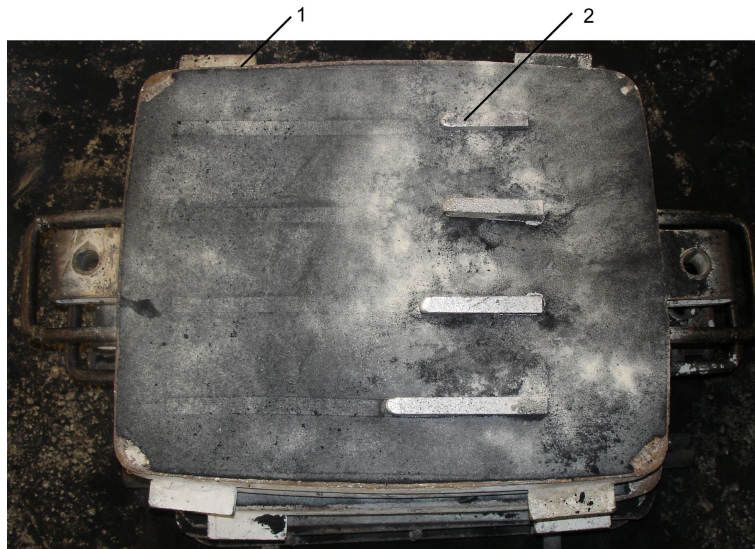
- 1 – gornjak
- 2 – litina
- 3 – donjak

Prikaz odljevaka uz korištenje polistirenskih modela gustoće $\rho = 12 \text{ kg/m}^3$ i $\rho = 30 \text{ kg/m}^3$ uz potpuno pun kalup slijedi na (sl. 6.25 ... 6.26).



Slika 6.25 Odljevci lijevani korištenjem polistirenskih modela gustoće 12 kg/m^3

- 1 – odljevak
- 2 – gornjak



Slika 6.26 Odljevci lijevani korištenjem polistirenskih modela gustoće 30 kg/m^3

1 – gornjak

2 – odljevak

U idućem poglavlju rada biti će detaljno analizirani rezultati prethodno opisanih ispitivanja.

7. REZULTATI ISPITIVANJA

Nakon provedenog lijevanja u pune kalupe kako probnih odljevaka tako i onih uz poboljšanja potrebno je osvrnuti se na rezultate lijevanja.

Sam postupak lijevanja, opis modela, kalupa i opreme opisani su u poglavlju 6 ovoga rada.

7.1 Metoda najmanjih kvadrata

Za analizu rezultata i prikaz na dijagramima korištena je matematička metoda nazvana metoda najmanjih kvadrata.

Osnove statističke analize danas su nužna znanja i za one koji se ne bave egzaktnim znanostima. Svijest o potrebi pravilne analize podataka uvela je statistiku i u kolegije većine društvenih fakulteta, dok je u trgovini i ekonomiji postala dio standardne svakodnevne prakse. Često proučavamo rezultate mjerenja ili statističkog istraživanja uspoređujući dvije skupine podataka X i Y . U fizikalnim problemima, kao što je na primjer slobodni pad, parovi varijabli koje se pojavljuju u opisu problema deterministički su povezani. Kod slobodnog su pada to proteklo vrijeme i prevaljeni put kamena koji pada.

No u svakom eksperimentu postoje i dodatni utjecaji koje ne možemo kontrolirati ili koje ne možemo dovoljno precizno odrediti; kod kamena koji pada teško je precizno uračunati utjecaj vjetera.

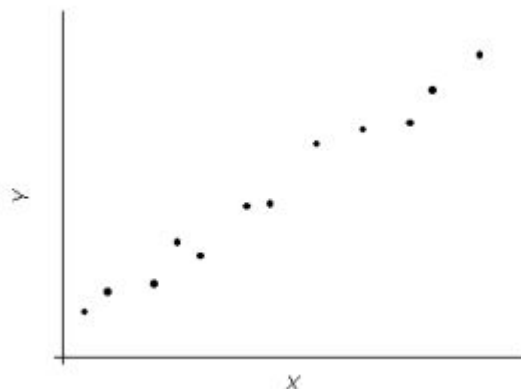
Dio statistike koji se bavi istraživanjem odnosa između dvije ili više varijabli povezanih na nedeterministički način zovemo regresijska analiza.

Najjednostavniji odnos dviju deterministički povezanih varijabli jest linearan odnos: $y = ax + b$.

No, ako dvije varijable nisu deterministički povezane, onda će za fiksiranu vrijednost x_i varijable X , varijabla Y_i biti slučajna. Općenito, varijabla čiju vrijednost određuje izvođač pokusa označava se s X te naziva nezavisnom varijablom. Za određeni x_i , slučajna varijabla Y_i naziva se zavisnom i poprima neku vrijednost y_i . U praksi se za nezavisnu varijablu uzima uvijek ona veličina koja je točnije mjerena.

Neka su x_1, x_2, \dots, x_n vrijednosti nezavisne varijable za koje se čine opažanja, a s Y_i i y_i označimo slučajnu varijablu i opaženu vrijednost pridruženu x_i -u.

Skup opaženih podataka sastoji se od n parova $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$. Takve podatke najprije ucrtamo u graf.



Slika 7.1 Primjer rasapa podataka [14]

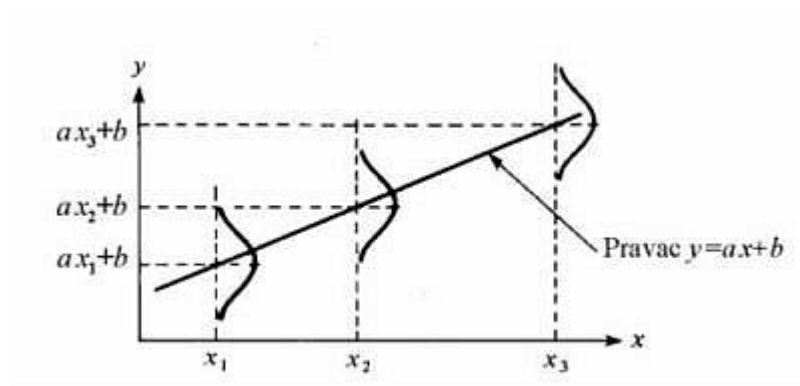
Promatranjem grafa procjenjujemo može li se dobivena ovisnost aproksimirati linearnom. Kada bi varijable X i Y bile deterministički linearno povezane, za svaki par (x_i, y_i) vrijedila bi relacija $y_i = ax_i + b$ i parametri a i b bili bi jedinstveni za sve parove. Budući da su Y_i slučajne varijable ne postoje jedinstveni koeficijenti koji bi zadovoljavali gornju relaciju za svaki par. Stoga pokušavamo pronaći takve a i b koji su najvjerojatniji parametri linearne ovisnosti koju smo pretpostavili. Metoda koja nam to omogućuje zove se *Metoda najmanjih kvadrata*.

Pretpostavljamo:

Postoje parametri a i b takvi da za svaku vrijednost x nezavisne varijable X , zavisnu varijablu Y možemo pisati kao: $Y = ax + b + \varepsilon$ gdje je ε normalna slučajna varijabla s očekivanjem $E(\varepsilon) = 0$ i varijancom $V(\varepsilon) = \sigma^2$.

σ^2 je jednaka za sve vrijednosti x .

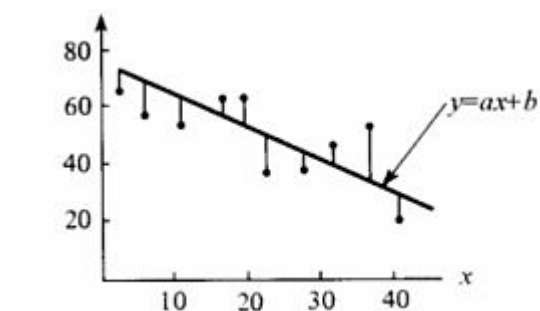
Koje je značenje pretpostavke? Pretpostavili smo da postoji jedan pravi (ispravan) pravac regresije koji za poznati x_i određuje očekivanu vrijednost $E(Y_i)$, a da su odstupanja vrijednosti y_i od očekivanja $E(Y_i)$ slučajne pogreške raspodijeljene prema Gaussu i jednako vjerojatne u cijelom području.



Slika 7.2 Pravac regresije [14]

Za izmjerene (opažene) parove vrijedi:

$$y_i = ax_i + b + \varepsilon_i$$



Slika 7.3 Pravac uz upotrebu metoda najmanjih kvadrata [14]

Od svih pravaca $y = ax + b$, najvjerojatniji pravac regresije je onaj za koji je suma kvadrata odstupanja minimalna.

$$f(a, b) = \sum_{i=1}^n [y_i - (ax_i + b)]^2 = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2$$

Suma kvadrata odstupanja je minimalna kada istodobno vrijedi:

$$\frac{\partial f(a,b)}{\partial a} = 0 \quad \text{i} \quad \frac{\partial f(a,b)}{\partial b} = 0$$

Uz te uvjete dobivamo sustav dvije jednačbe s dvije nepoznanice;

$$\begin{aligned}\sum_{i=1}^n y_i x_i - a \sum_{i=1}^n x_i^2 - b \sum_{i=1}^n x_i &= 0 \\ \sum_{i=1}^n y_i - a \sum_{i=1}^n x_i - nb &= 0\end{aligned}$$

koji kada riješimo daje izraze za najvjerojatnije vrijednosti koeficijenata a i b :

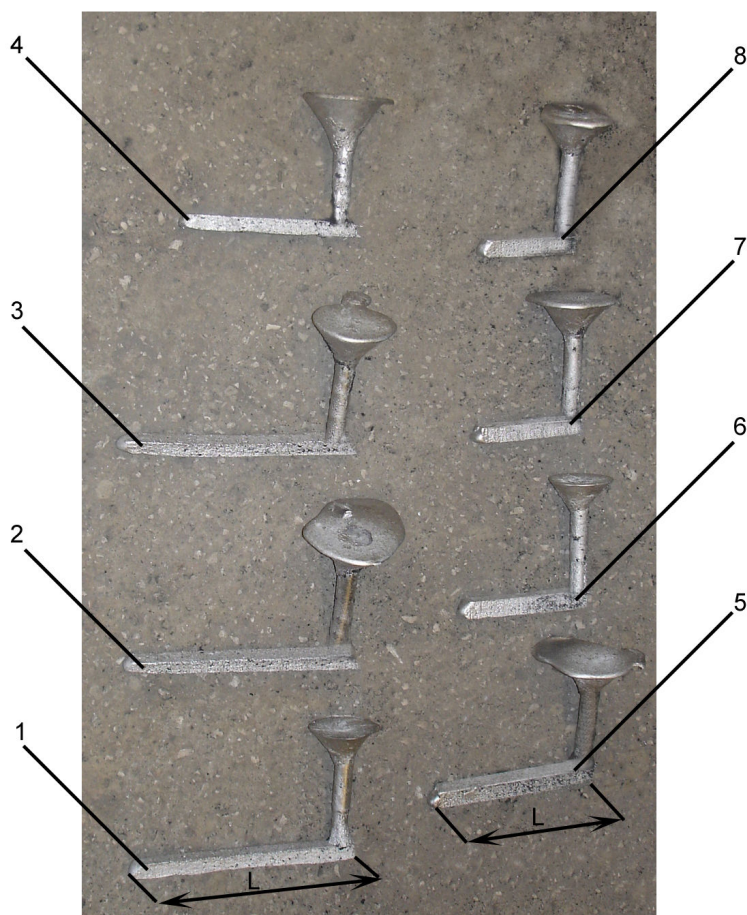
$$a = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \quad \text{i} \quad b = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 \sum_{i=1}^n y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n x_i y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2}$$

Odsječak b na y -osi možemo jednostavnije pisati:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n y_i - a \sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

7.2 Analiza rezultata ispitivanja

Nakon operacije ulijevanja, hlađenja i čišćenja odljevaka izvršena su mjerenja prikazana u (tabl. 7.1 ... 7.2). Slijedi prikaz odljevaka na (sl. 7.4). Na lijevoj polovici slike prikazani su odljevci dobiveni korištenjem polistirenskih modela gustoće 12 kg/m^3 , a na desnoj odljevci dobiveni korištenjem polistirenskih modela gustoće 30 kg/m^3 . Temperature koje su korištenje prilikom lijevanja te mjerenja dužine odljevaka prikazane su u (tabl. 7.1 ... 7.2).



Slika 7.4 Odljevci uz potpuno popunjen kalup (visine 150 mm)
Odljevci dobiveni korištenjem polistirenskih modela gustoće 12 kg/m^3 (lijevo)
Odljevci dobiveni korištenjem polistirenskih modela gustoće 30 kg/m^3 (desno)

Tablica 7.1 Prikaz livljivosti u L [mm] u ovisnosti o temperaturi za gustoću $\rho = 12 \text{ kg/m}^3$ i visinu kalupa od 150 mm

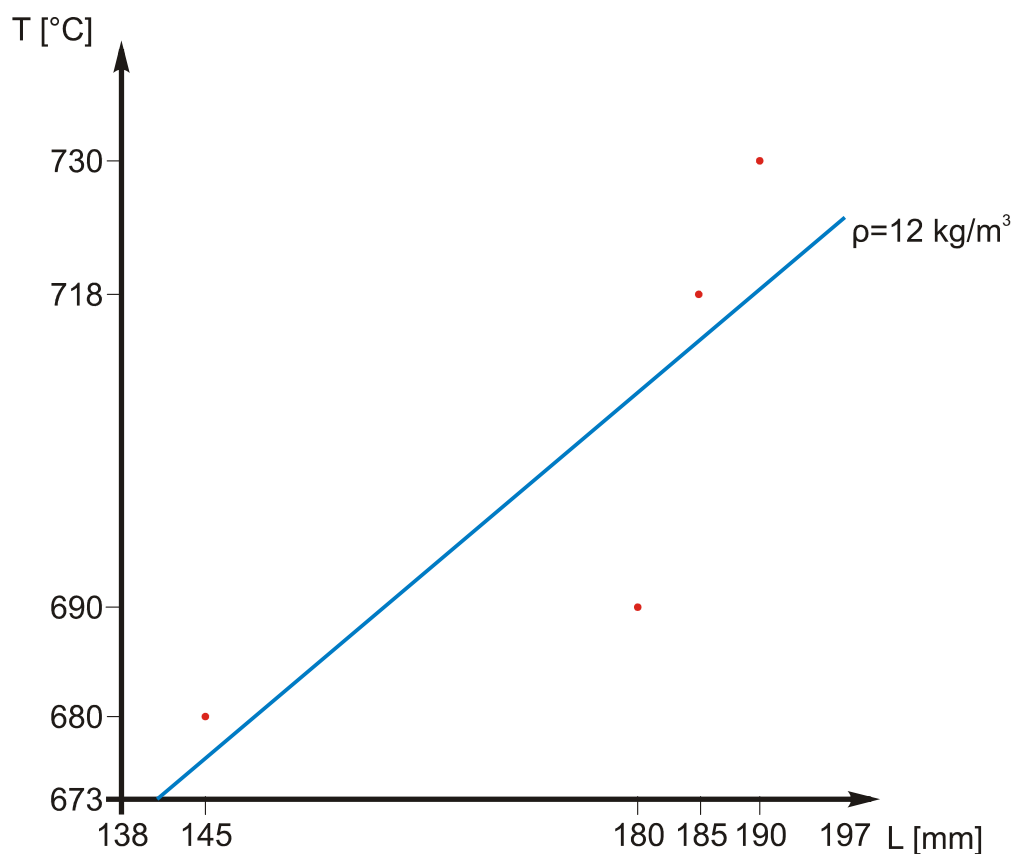
Gustoća polistirenskog modela $\rho = 12 \text{ kg/m}^3$	T [°C]	L [mm]
1. odljevak	730	190
2. odljevak	718	185
3. odljevak	690	180
4. odljevak	680	145

Tablica 7.2 Prikaz livljivosti u L [mm] u ovisnosti o temperaturi za gustoću $\rho = 30 \text{ kg/m}^3$ i visinu kalupa od 150 mm

Gustoća polistirenskog modela $\rho = 30 \text{ kg/m}^3$	T [°C]	L [mm]
5. odljevak	730	145
6. odljevak	718	115
7. odljevak	690	95
8. odljevak	680	85

Cilj je dobiti odnos, a ujedno i pretpostavku za daljnja razmatranja, između temperature i livljivosti aluminija.

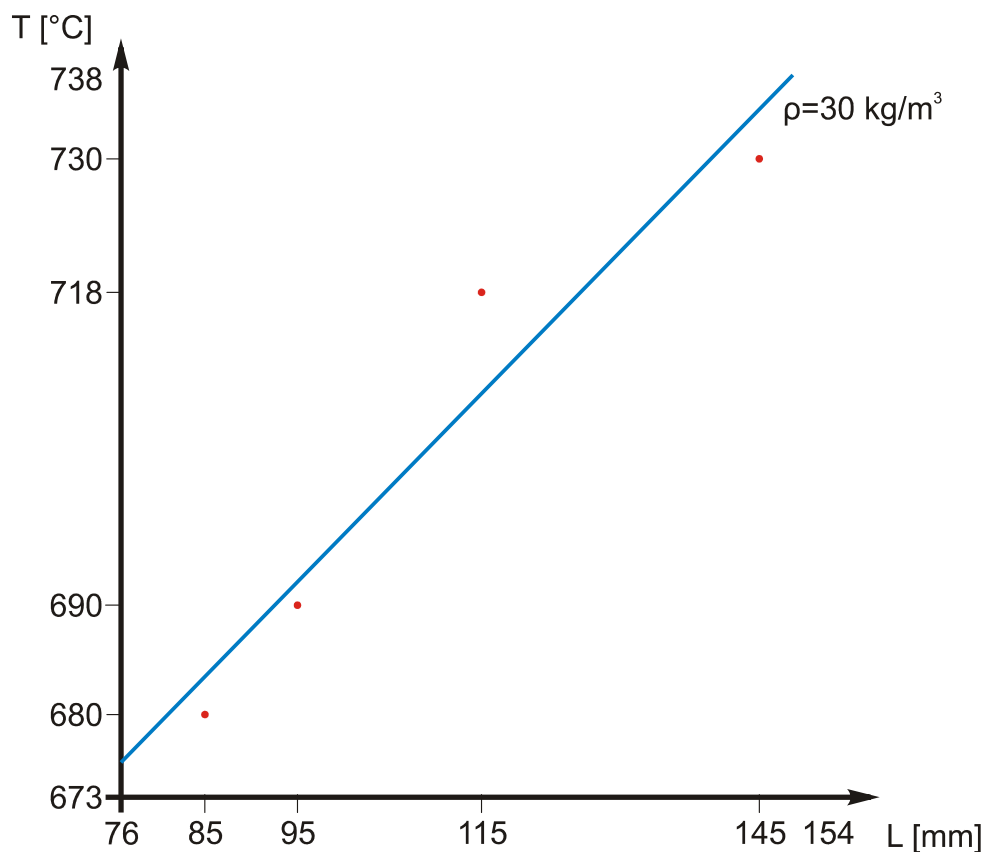
Na (sl. 7.5) prikazan je graf, izrađen po ranije opisanoj metodi najmanjih kvadrata.



Slika 7.5 Graf ovisnosti temperature i duljine uz upotrebu polistirenskih modela gustoće 12 kg/m^3 te uz visinu kalupa 150 mm

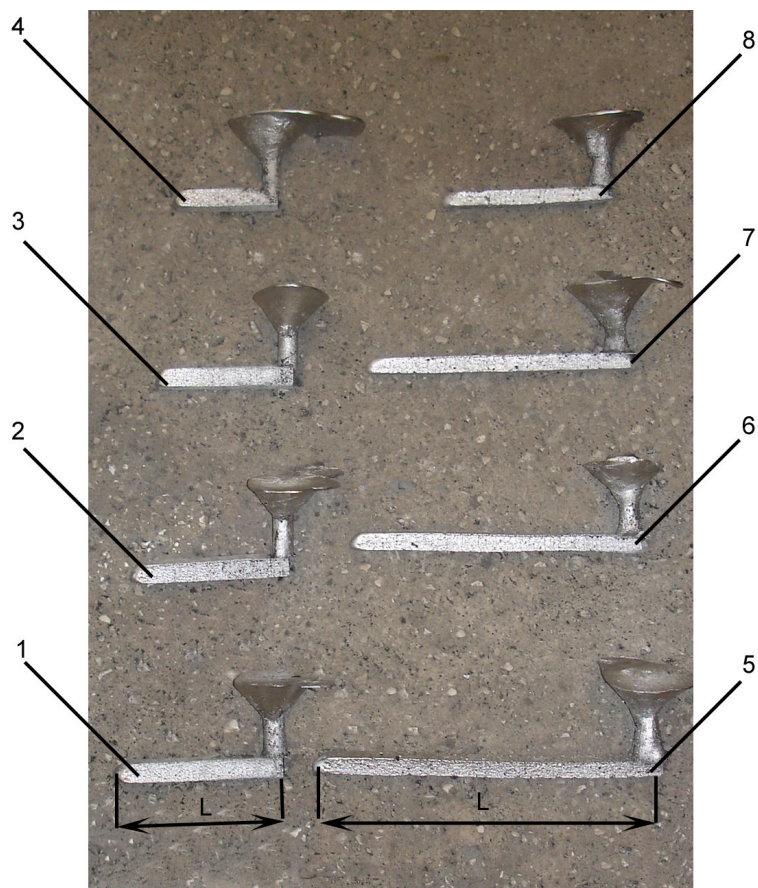
Na (sl. 7.5) kao i na idućim slikama crvene točke prikazuju poziciju točaka s obzirom na os X (duljina L) i os Y (temperatura T). Pravac regresije ranije opisan označen je na svim grafovima plavom bojom.

Na (sl. 7.6) prikazan je graf uz upotrebu polistirenskih modela gustoće 30 kg/m^3 te uz visinu kalupa 150 mm.



Slika 7.6 Graf ovisnosti temperature i duljine uz upotrebu polistirenskih modela gustoće 30 kg/m^3 te uz visinu kalupa 150 mm

Operacija kalupljenja polistirenskih modela uz popunjavanje kalupa do visine 75 mm izvršena je na isti način te su dobiveni slijedeći rezultati. Prikaz odljevaka je na (sl. 7.7), a rezultati u (tabl. 7.3 ... 7.4). Na lijevoj polovici slike prikazani su odljevci dobiveni korištenjem polistirenskih modela gustoće 30 kg/m^3 , a na desnoj odljevci dobiveni korištenjem polistirenskih modela gustoće 12 kg/m^3 . Temperature koje su korištenje prilikom lijevanja te mjerenja dužine odljevaka prikazane su u (tabl. 7.3 ... 7.4).



Slika 7.7 Odljevci uz kalup popunjen do visine 75 mm
 Odljevci dobiveni korištenjem polistirenskih modela gustoće 30 kg/m^3 (lijevo)
 Odljevci dobiveni korištenjem polistirenskih modela gustoće 12 kg/m^3 (desno)

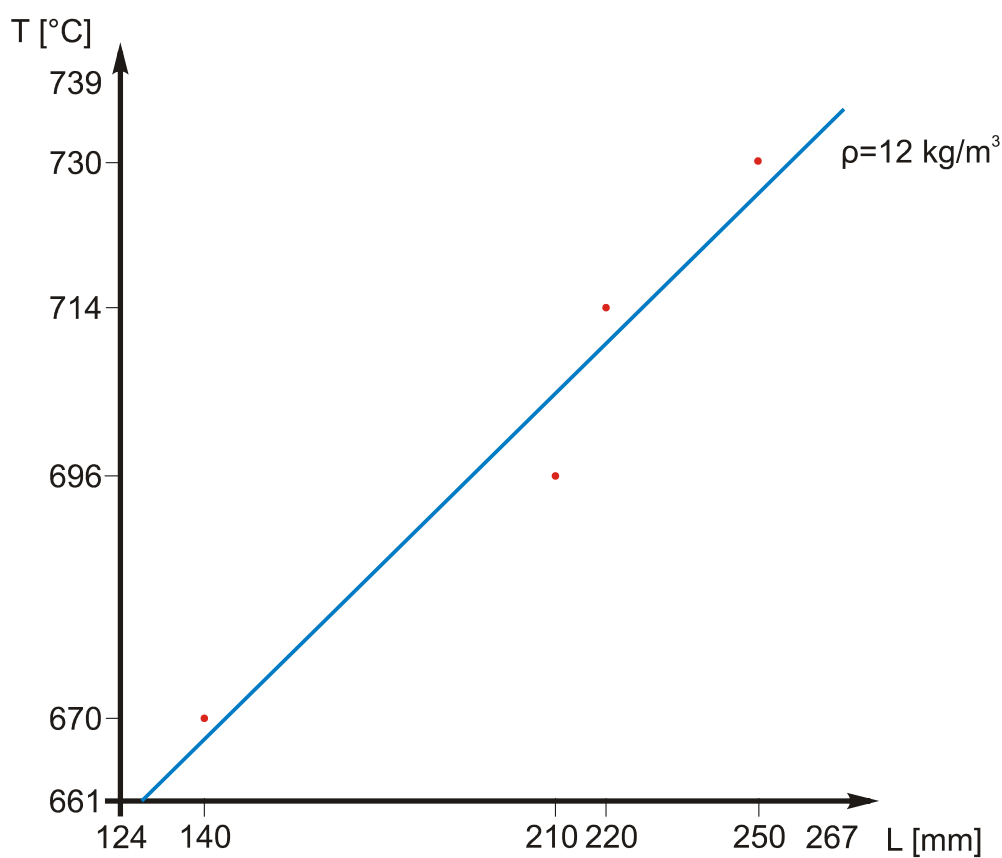
Tablica 7.3 Prikaz livljivosti u L [mm] u ovisnosti o temperaturi za gustoću $\rho = 30 \text{ kg/m}^3$
 i visinu kalupa od 75 mm

Gustoća polistirenskog modela $\rho = 30 \text{ kg/m}^3$	T [$^{\circ}\text{C}$]	L [mm]
1. odljevak	730	125
2. odljevak	714	119
3. odljevak	696	110
4. odljevak	670	88

Tablica 7.4 Prikaz livljivosti u L [mm] u ovisnosti o temperaturi za gustoću $\rho = 12 \text{ kg/m}^3$ i visinu kalupa od 75 mm

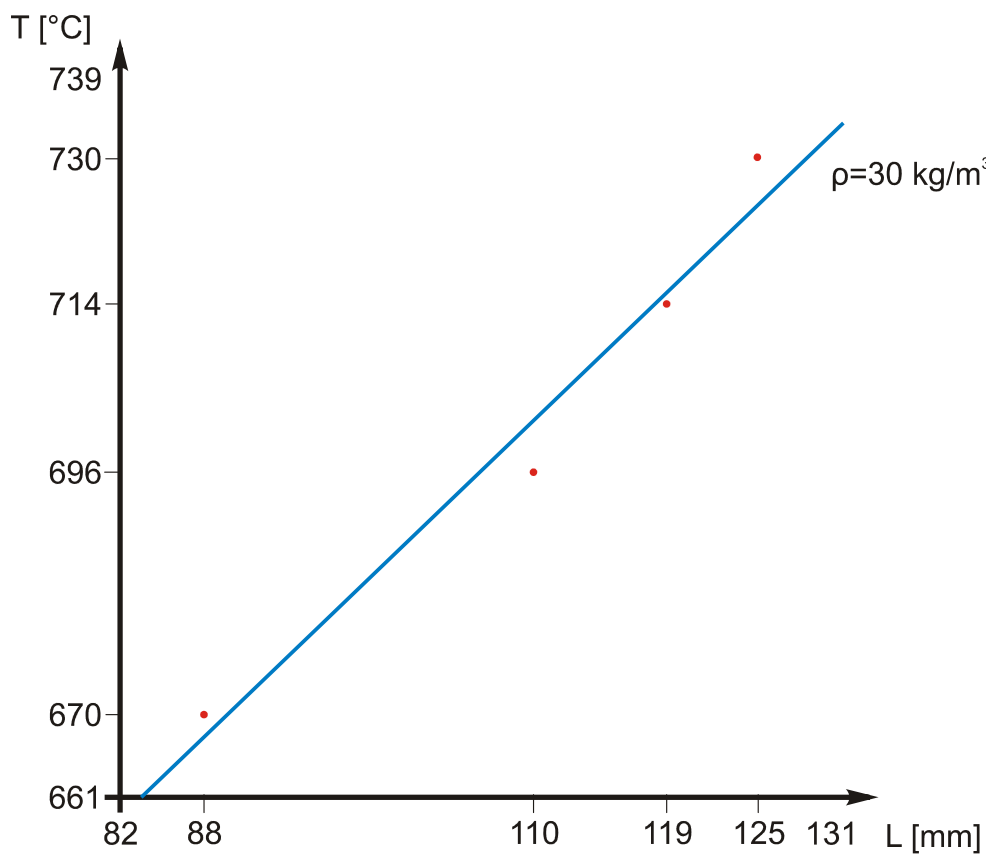
Gustoća polistirenskog modela $\rho = 12 \text{ kg/m}^3$	T [°C]	L [mm]
5. odljevak	730	250
6. odljevak	714	220
7. odljevak	696	210
8. odljevak	670	140

Na (sl. 7.8) prikazan je graf uz upotrebu polistirenskih modela gustoće 12 kg/m^3 te uz visinu kalupa 75 mm.



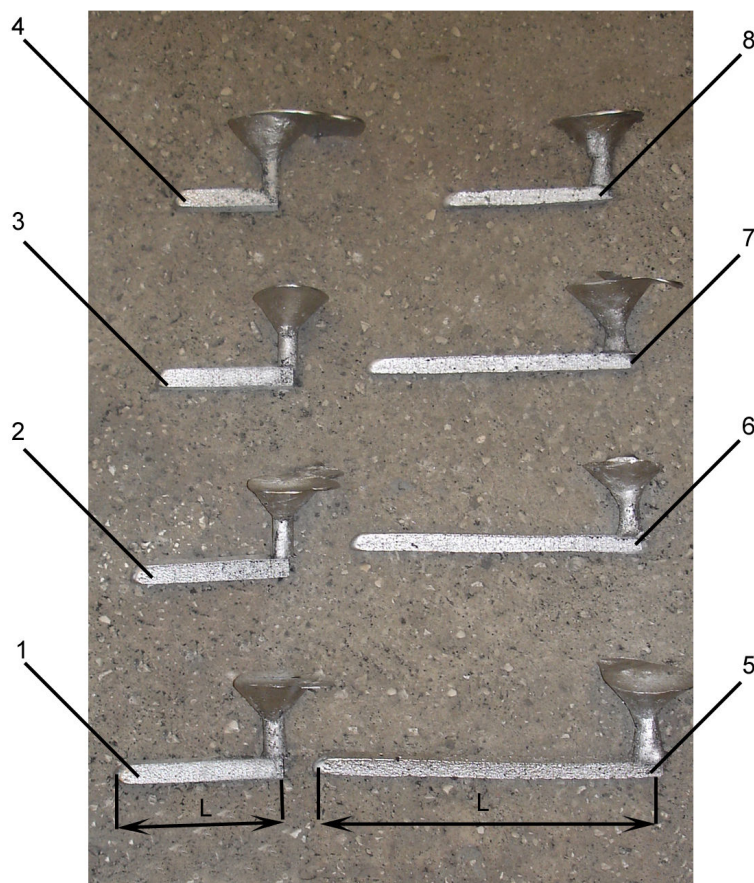
Slika 7.8 Graf ovisnosti temperature i duljine uz upotrebu polistirenskih modela gustoće 12 kg/m^3 te uz visinu kalupa 75 mm

Na (sl. 7.9) prikazan je graf uz upotrebu polistirenskih modela gustoće 30 kg/m^3 te uz visinu kalupa 75 mm .



Slika 7.9 Graf ovisnosti temperature i duljine uz upotrebu polistirenskih modela gustoće 30 kg/m^3 te uz visinu kalupa 75 mm

Na (sl. 7.10) prikazani su odljevci dobiveni korištenjem polistirenskih modela gustoće $\rho = 20 \text{ kg/m}^3$. Temperature koje su korištenje prilikom lijevanja te mjerenja dužine odljevaka prikazane su u (tabl. 7.5 ... 7.6).



Slika 7.10 Odljevci dobiveni uz upotrebu polistirena gustoće 20 kg/m^3

Odljevci dobiveni uz visinu kalupa od 75 mm (lijevo)

Odljevci dobiveni uz visinu kalupa od 150 mm (desno)

Jedan kalup bio je popunjen do pune visine, a drugi do visine 75 mm. Slika daje jasan prikaz da gustoća polistirenskih modela jest nužan ali ne i jedini uvjet livljivosti. Bolja livljivost metala zamjećena je kod kalupa ispunjenog do polovice visine, odnosno 75 mm.

U (tabl. 7.5 ... 7.6) prikazani su rezultati mjerenja odljevaka prilikom korištenja polistirena gustoće 20 kg/m^3 uz upotrebu kalupa popunjenog do 75 mm odnosno 150 mm.

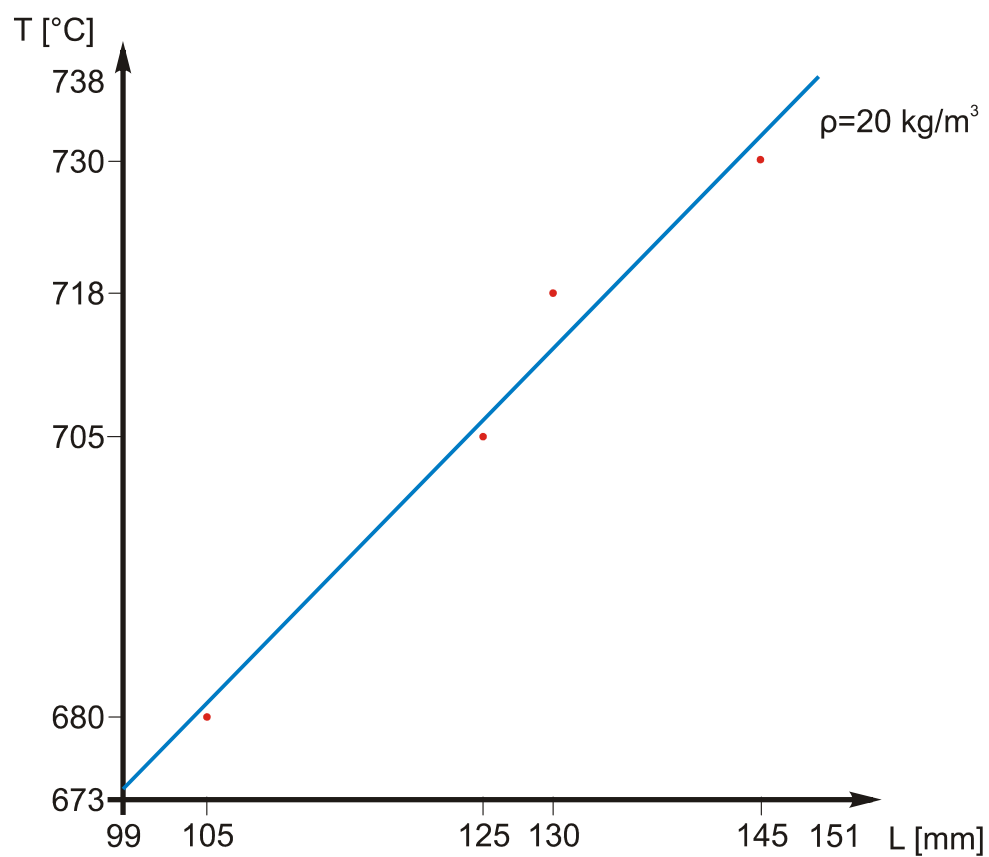
Tablica 7.5 Prikaz livljivosti u L [mm] u ovisnosti o temperaturi za gustoću $\rho = 20 \text{ kg/m}^3$ i visinu kalupa od 75 mm

Gustoća polistirenskog modela $\rho = 20 \text{ kg/m}^3$	T [°C]	L [mm]
1. odljevak	730	155
2. odljevak	718	135
3. odljevak	705	127
4. odljevak	680	110

Tablica 7.6 Prikaz livljivosti u L [mm] u ovisnosti o temperaturi za gustoću $\rho = 20 \text{ kg/m}^3$ i visinu kalupa od 150 mm

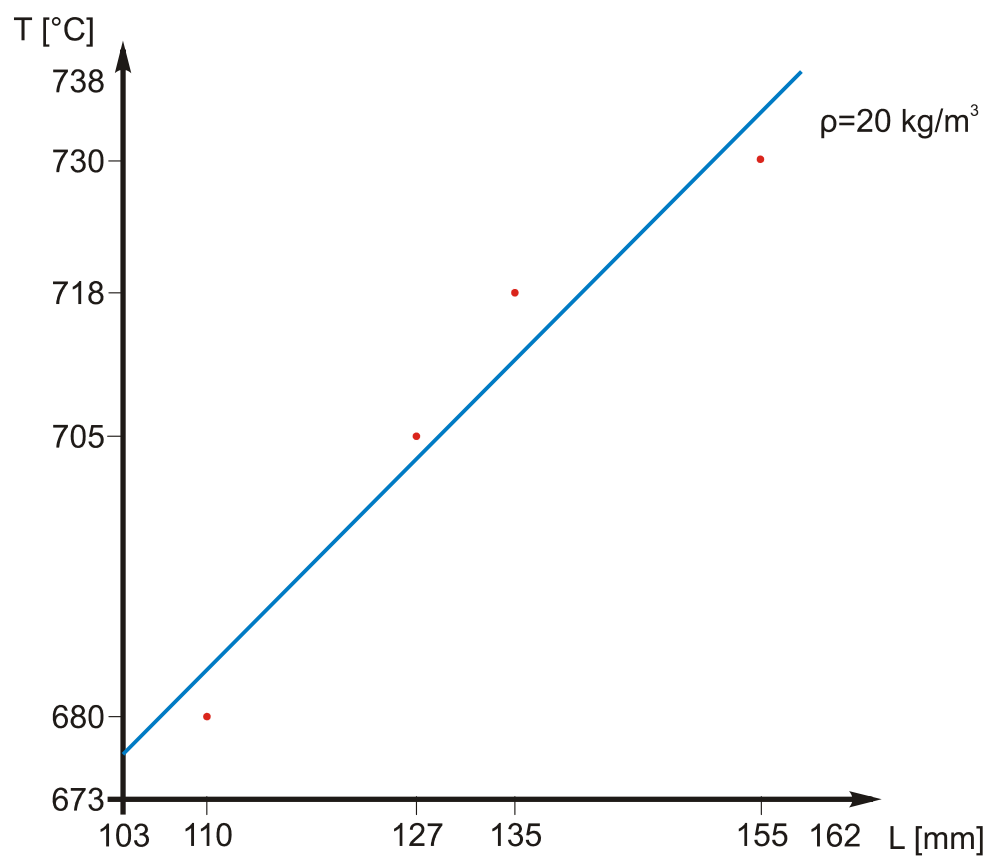
Gustoća polistirenskog modela $\rho = 20 \text{ kg/m}^3$	T [°C]	L [mm]
1. odljevak	730	145
2. odljevak	718	130
3. odljevak	705	125
4. odljevak	680	105

Na (sl. 7.11) prikazan je graf uz upotrebu polistirenskih modela gustoće 20 kg/m^3 te uz visinu kalupa 150 mm .



Slika 7.11 Graf ovisnosti temperature i duljine uz upotrebu polistirenskih modela gustoće 20 kg/m^3 te uz visinu kalupa 150 mm

Na (sl. 7.12) prikazan je graf uz upotrebu polistirenskih modela gustoće 20 kg/m^3 te uz visinu kalupa 75 mm .



Slika 7.12 Graf ovisnosti temperature i duljine uz upotrebu polistirenskih modela gustoće 20 kg/m^3 te uz visinu kalupa 75 mm

8. ZAKLJUČAK

Na temelju do sada iznesenog vidljive su prednosti i mane tehnologije lijevanja odljevaka korištenjem polistirenskih modela. U mnogim europskim zemljama i čitavom svijetu ovaj je postupak postao izrazito bitan element u tehnologiji lijevanja. Mnogi problemi koji nastaju prilikom lijevanja i kalupljenja uobičajenim metodama više nisu nerješivi zbog prednosti ovoga postupka.

Ograničenja kao i kod većine postupaka u čitavoj struci, a ne samo lijevačkoj, postoje ali su zanemariva u usporedbi sa prednostima koje ova tehnologija lijevanja omogućuje. Postupak će zasigurno zbog svojih prednosti sve više biti u upotrebi mnogih tvrtki koje se bave lijevanjem, pa čak i u masovnoj proizvodnji odljevaka. Postupak se širi u masovnoj i serijskoj proizvodnji, a veliku primjenu ima u automobilskoj industriji za izradu najraznovrsnijih dijelova automobila.

Inženjeri u čitavom svijetu svakodnevno rade na brojnim ispitivanjima kako bi se postupak poboljšao te ograničenja svela na minimum. Jedan doprinos lijevačkoj struci je svakako i mjerenje livljivosti aluminijskog kalupa prilikom lijevanja u puni kalup. Sam postupak, mjerenja i analiza opisani su u ranijim poglavljima.

Rezultati pokusa opisanog u ovome radu, svakako su iznimno interesantni. Uvidom u tablice i grafove u poglavlju 7 moguće je zaključiti slijedeće. Gustoća polistirena za izradu modela, temperatura lijevanja, visina kalupa te njegova sabijenost znatno utječu na livljivost. S porastom temperature lijevanja, za istu gustoću, raste livljivost. Ako se smanji gustoća polistirena, za istu temperaturu lijevanja, rasti će livljivost. Na livljivost utječe i visina kalupa, tj. livljivost raste sa smanjenjem visine kalupa. Naravno, treba voditi računa o dovoljnoj metalostatskoj visini ulijevanja prilikom mijenjanja visine kalupa. Zadaća je inženjera, kako konstruktora tako i tehnologa, da o tome vode računa kako bi pravilnom konstrukcijom kalupa, modela i uljevnog sustava dobili odgovarajuće odljevke najbolje kvalitete. Posebnu pažnju treba posvetiti odabiru polistirena odgovarajuće gustoće, temperaturi ulijevanja te uljevnom sustavu.

Ovaj će postupak biti sve rašireniji u budućnosti jer uspješno zamjenjuje mnoge konvencionalne načine kalupljenja i lijevanja.

9. LITERATURA

- [1] Tehnička enciklopedija 6, ZAGREB MCMLXXIX, IZDANJE I NAKLADA JUGOSLAVENSKOG LEKSIKOGRAFSKOG ZAVODA
- [2] Bonačić Mandinić Z., Budić I., Osnove tehnologije kalupljenja – Jednokratni kalupi 1.dio, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Slavonski Brod, 2001.
- [3] Budić I., Posebni ljevački postupci 1. dio, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Slavonski Brod, 2006.
- [4] http://farm2.static.flickr.com/1263/1402633025_a93dad33b0.jpg, 29.4.2008.
- [5] [http://www.mse.mtu.edu/classes/my4130/workarch/ws4\(01\)/blockheadck.jpg](http://www.mse.mtu.edu/classes/my4130/workarch/ws4(01)/blockheadck.jpg), 30.4.2008
- [6] [http://www.mse.mtu.edu/classes/my4130/workshops/ws2\(02\)/headend1.jpg](http://www.mse.mtu.edu/classes/my4130/workshops/ws2(02)/headend1.jpg), 3.5.2008.
- [7] http://www.sfsa.org/tutorials/eng_block/GMBlock.pdf, 6.5.2008.
- [8] <http://www.theworkshop.ca/casting/foamcasting/foamcasting.htm>, 12.5.2008.
- [9] http://www.wtec.org/loyola/casting/fh05_20.jpg, 18.5.2008.
- [10] http://foundry.zcat.us/LFC_Pictures.html, 18.5.2008
- [11] http://www.didion.com/testimonial_fettling.htm, 22.5.2008.
- [12] http://www.rosler.com/www_roesler2004/robot_shotblasting_666_140_0_f.htm, 1.6.2008.
- [13] <http://www.kemenovic.com>, 20.4.2008.
- [14] <http://dominis.phy.hr/~kvurnek/SAMP/SEMINAR/zavrsni.html#Metoda>, 17.5.2008.